



André Cardoso Melo

**Estudo da flexibilidade em tubos curvos obtidos
por gomos retos**



André Cardoso Melo

**Estudo da flexibilidade em tubos curvos obtidos
por gomos retos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Francisco José M. Queirós de Melo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes

Professor Associado, Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado, Universidade de Aveiro (Orientador)

Professor Doutor José Pedro Arteiro Reina

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Arguente Principal)

**agradecimentos /
acknowledgements**

Deixo expressos os meus sinceros agradecimentos às seguintes instituições e pessoas, sem as quais o presente trabalho não teria sido possível:

Ao meu orientador, Professor Doutor Francisco José M. Queirós de Melo, por todo o apoio e precioso incentivo;

À Universidade de Aveiro, e em particular ao Departamento de Engenharia Mecânica, pela receptividade, acolhimento, condições disponibilizadas e apoio técnico e administrativo ao longo destes anos de aprendizagem;

Ao meu grande amigo Márcio Silva pelo enorme contributo oferecido, sem o qual não seria possível a conclusão deste trabalho;

Aos colegas, que sempre me acolheram com afeto e amizade;

À minha família por me ter dado oportunidade de estudar e pelo apoio mesmo nos momentos mais difíceis;

Ao meu irmão, Daniel Melo, pela amizade e paciência durante mais este ciclo na minha vida académica;

À minha namorada, Andreia Cunha, pelo estímulo, amizade e carinho;

A todos, muito obrigado.

palavras-chave

Curva segmentada, Compósitos, Fator de flexibilidade, Elementos finitos, Flexão no plano, Ovalização.

resumo

Hoje em dia, toda e qualquer instalação industrial possui algum tipo de sistema de tubagens, onde os elementos curvos são uma constante. A flexibilidade é uma necessidade nestas instalações, tornando a sua correta avaliação de vital importância no projeto das mesmas, sendo por isso o objeto desta dissertação.

Neste contexto, o presente trabalho compreende o cálculo analítico da solução para o fator de flexibilidade de uma curva segmentada, com um ângulo total de 90° e dois segmentos, sujeita a flexão negativa no plano. Este cálculo foi efetuado a partir do valor estacionário da energia de deformação em ordem a parâmetros desconhecidos associados à amplitude dos deslocamentos decorrentes da deformação desta estrutura. Em seguida é feita a comparação desta solução com as presentes nos códigos da *American Society of Mechanical Engineers* e *Nederlands Normalisatie-instituut*, assim como com soluções de outros autores. Foram também conduzidas simulações computacionais a modelos tridimensionais da curva pelo método dos elementos finitos, complementadas por um procedimento experimental, de forma a validar os resultados obtidos nas simulações numéricas efetuadas. Finalmente, foram comparados os fatores de flexibilidade da curva em material metálico com a mesma em material compósito, de modo a compreender a forma como a componente material influencia a flexibilidade de uma instalação de tubagens.

As principais observações a retirar deste estudo são que a curva metálica possui uma flexibilidade similar à da curva compósita com as mesmas propriedades geométricas e um ângulo de enrolamento filamentar de 55° ; os códigos aplicáveis são algo conservadores no que toca ao fator de flexibilidade, sendo possível obter de forma simples o fator de flexibilidade de curvas segmentadas em material compósito.

keywords

Mitered bend, Composites, Flexibility factor, Finite elements, In-plane bending, Ovalization.

abstract

Nowadays, any industrial installation has some kind of piping system, where curved pipe elements are practically permanent accessories. The piping system flexibility is a necessary attribute, as it reduces the intensity of internal reactions from thermal and mechanical forces. Its correct evaluation is of vital importance in the installation's performance, a reason for which it is the choice of object of this dissertation.

In this context, the present work comprehends the analytical calculation of the flexibility factor of a mitered bend, with a 90° bend angle and two segments, subjected to in-plane bending, by the minimal deformation energy method. A comparison is then made between this solution and the ones presented in the *American Society of Mechanical Engineers* and the *Nederlands Normalisatie-instituut* code as well as with other author's solution. Computational simulations with three-dimensional models of the pipe bend, by the finite element method, were also conducted. An experimental procedure was yet carried out, the purpose of which was to validate the finite element analysis results and therefore the analytical calculation's results. Finally, a comparison between the metallic and composite curve's flexibility factor is made, so that one could comprehend the way the material influences the flexibility of the piping installation.

The main observations to extract from this study are that the metallic curve has a similar flexibility factor as the composite curve with the same geometric properties and a winding angle of 55° ; the applicable codes are somewhat conservative about the flexibility factor, and it is possible to obtain the flexibility factor of composite mitered curves in a simple way.

Conteúdo

Lista de Tabelas	i
Lista de Figuras	ii
Lista de Símbolos e Acrónimos	v
1 Estrutura da Dissertação e Objetivos	1
2 Introdução	5
2.1 Contexto Histórico	5
2.2 Contexto Económico	6
2.3 Aplicações Por Setor	8
2.4 Materiais de Construção de Tubagens	11
2.5 Normas Gerais	12
2.6 Curvas Segmentadas	12
3 Estado da Arte	15
3.1 Revisão Literária	15
3.1.1 Análise Analítica e Experimental de Curvas Segmentadas	16
3.1.2 Elementos Finitos	22
3.2 Revisão Tecnológica	26
3.2.1 Enrolamento Filamentar Descontínuo	26
3.2.2 Enrolamento Filamentar Contínuo	28
3.2.3 Processo de Moldação Por Centrifugação	29
3.2.4 Tubagens Bobinadas	31
3.2.5 Fabrico de Acessórios e Curvas Por Moldação Manual	31
3.2.6 Fabrico de Acessórios e Curvas Por Enrançado de GRP	32
3.2.7 Fabrico de acessórios e Curvas Por Enrolamento Filamentar	34
3.2.8 Fabrico de Curvas Segmentadas de GRP	34
4 Metodologia de Cálculo Analítico da Flexibilidade	37
4.1 Análise de Deformações e Deslocamentos	38
4.2 Determinação da Flexibilidade da Curva Metálica	42
4.3 Determinação da Flexibilidade da Curva Compósita	45
5 Normas e outras Metodologias Sobre o Cálculo do Fator de Flexibilidade	49
5.1 ANSI/ASME B31.8 (1979)	49
5.2 Gresnigt (1986)	50
5.3 NEN 3650 (1992)	51
6 Caso de Estudo: Curva Segmentada Sujeita a Flexão Negativa no Plano da Curva	53
6.1 Parâmetros Geométricos e Condições de Carregamento	53
6.2 Materiais	55
6.2.1 Modelo Metálico	55
6.2.2 Modelo Compósito	60

7	Simulação Numérica Por Análise de Elementos Finitos	63
7.1	Definição do Modelo da Curva Segmentada	63
7.2	Definição do Material	64
7.3	Definição dos Elementos	65
7.4	Definição das Condições de Fronteira e Carregamento	67
7.5	Definição do Modelo do Tubo Reto Equivalente	69
8	Análise Experimental	73
8.1	Idealização do Ensaio Mecânico	73
8.2	Construção do Conjunto Para Análise Experimental	75
8.3	Metodologia Experimental	79
9	Apresentação de Resultados	83
9.1	Curva Segmentada Metálica	83
9.1.1	Comparação Entre os Resultados Analíticos, Numéricos e Experimentais .	83
9.1.2	Comparação Entre os Fatores de Flexibilidade Obtidos e Códigos Existentes	87
9.2	Curva Segmentada Compósita	90
9.2.1	Comparação Entre os Resultados Analíticos e Numéricos	90
9.2.2	Comparação Entre os Fatores de Flexibilidade Obtidos	93
10	Conclusões e Trabalhos Futuros	97
10.1	Conclusões	97
10.2	Trabalhos Futuros	99
	Bibliografia	101
	Anexos	105
A	Código “Matlab” do Cálculo Analítico da Curva Segmentada Metálica	107
B	Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos da Curva Segmentada Metálica	113
C	Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos do Tubo Reto Equivalente Metálico	123
D	Código “Matlab” do Cálculo Analítico da Curva Segmentada Compósita	131
E	Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos da Curva Segmentada Compósita	137
F	Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos do Tubo Reto Equivalente Compósito	149
G	Código “Matlab” do Cálculo Analítico do Ensaio de Compressão Radial	157
H	Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos do Ensaio de Compressão Radial	161
I	Código “Matlab” do Tratamento de Dados Experimentais Sobre a Flexão Negativa do Conjunto de Teste	167
J	Desenhos Técnicos do Conjunto de Teste Afeto à Análise Experimental	171

Lista de Tabelas

2.1	Normas aplicáveis a tubagens, com ou sem pressão.	12
6.1	Dimensões do espécime testado sob compressão radial.	56
6.2	Módulo de <i>Young</i> (E), mediante formulações de <i>Young</i> e <i>Feodosiev</i>	58
6.3	Parâmetros do modelo material metálico.	59
6.4	Propriedade mecânicas das fibras <i>E-Glass</i> [54].	61
6.5	Propriedade mecânicas da matriz <i>EPIKOTE 862/EPIKURE W</i> [54].	61
6.6	Propriedade mecânicas do compósito <i>E-Glass/E</i> [54].	62
7.1	Propriedades físicas do aço usado na análise experimental.	64
7.2	Constantes de engenharia introduzidas no modelo da curva compósita estudada. .	65
7.3	Resultados da análise de convergência.	67
9.1	Resultados relevantes, derivados dos ensaios de flexão negativa.	84
9.2	$M(d\alpha_0 = 0.001rad)$ de acordo com as metodologias numérica, analítica e experi- mental.	86
9.3	Erro relativo entre o momento fletor obtido através das metodologias numérica, analítica e experimental, para $d\alpha_0 = 0.001rad$	86
9.4	Momento fletor obtido através das metodologias numérica e analítica, para $d\alpha_0 =$ $0.001rad$, e respetivo erro.	87
9.5	Fatores de flexibilidade resultantes da análise da curva segmentada metálica. . . .	89
9.6	Erros relativos dos fatores de flexibilidade resultantes da análise da curva segmen- tada metálica.	89
9.7	Momento fletor obtido através das metodologias numérica e analítica, para $d\alpha_0 =$ $0.001rad$, e respetivo erro.	92
9.8	Momento fletor obtido através das metodologias numérica e analítica, para $d\alpha_0 =$ $0.001rad$, para o caso do tubo reto equivalente.	92
9.9	Fatores de flexibilidade resultantes da análise da curva segmentada compósita. . .	95

Lista de Figuras

2.1	Exemplos históricos de tubagens.	6
2.2	Visão sobre o mercado mundial de tubagem em 2010 [8].	7
2.3	Plataforma petrolífera brasileira P-51 [9].	8
2.4	Foto aérea de um aqueduto de transferência de água não tratada [10].	9
2.5	Rede de tubagens industriais [8].	10
2.6	Instalação fabril petroquímica localizada na Arábia Saudita [11].	10
2.7	Exemplos ilustrativos de efeitos corrosivos em tubagens metálicas.	11
2.8	Métodos de conformação de tubos retos em curvas lisas (processos a frio).	13
2.9	Representação do sistema de coordenadas de uma casca cilíndrica [14].	14
3.1	Publicações sobre curvas segmentadas [16].	15
3.2	Espectro de análise de curvas segmentadas [16].	16
3.3	Representação de um teste experimental de flexão fora do plano da curva, realizado por <i>Bond e Kitching</i> [22].	17
3.4	Teste experimental de flexão no plano da curva, realizado por <i>Gresnigt</i> [3].	18
3.5	Tensões em curva de 90° sujeita a flexão. Teste realizado por <i>Kitching e Hose</i> [26].	19
3.6	Arranjos experimentais típicos [16].	20
3.7	Conjunto construído para os testes de <i>Kitching e Hose</i> [26].	20
3.8	Comparação do campo de tensões, na secção AA (figura 3.7), obtidos durante os testes de <i>Kitching e Hose</i> [26]: (a) direção circunferencial; (b) direção longitudinal.	21
3.9	Comparação de fatores de flexibilidade, calculados por <i>Queirós de Melo et al</i> [30].	22
3.10	Modelo de elementos finitos usado por <i>Babaii Kocheckseraii</i> [36].	23
3.11	Variação da pressão interna limite, com o ângulo de curvatura ($angcurv = 2 \times mitreangle$), obtido nos testes de <i>Babaii Kocheckseraii e Robinson</i> [38].	24
3.12	Procedimento experimental e instrumentação usada nos testes de <i>R. Neilson et al</i> [39].	24
3.13	Ovalização e campo de tensões obtidos nas simulações numéricas de <i>R. Neilson et al</i> [39].	25
3.14	Resultados do estudo de <i>R. Neilson et al.</i>	25
3.15	Representação esquemática do processo de Enrolamento Filamentar [44].	27
3.16	Ilustrações do processo de DFW.	27
3.17	Ilustração do processo de Enrolamento Filamentar Contínuo [46].	28
3.18	Processo de corte usado no método de CFW [46].	29
3.19	Ilustração da continuidade do processo de CFW [46].	29
3.20	Extração de um tubo do molde de moldação por centrifugação [46].	30
3.21	Ilustrações de secções obtidas por CCP.	30
3.22	Exemplos de tubagem <i>spoolable</i>	31
3.23	Aplicação de reforço por moldação manual, numa curva compósita [12].	32
3.24	Exemplo de um acessório obtido por moldação manual [12].	32
3.25	Ilustração representativa do processo de entrançado de GRP [49].	33
3.26	Estrutura de <i>braiding</i> , da <i>Herzog</i> , com apoio de um robô de 6 eixos <i>Kuka</i> [49].	33
3.27	Exemplos do fabrico de acessórios por enrolamento filamentar.	34
3.28	Curva segmentada compósita de grandes dimensões [8].	35

3.29	Curva segmentada compósita, onde é visível a ligação entre segmentos [8].	35
4.1	Representação da deformada de uma curva segmentada, sujeita a “flexão positiva” [3].	37
4.2	Representação da variação do ângulo de curvatura de uma curva segmentada, sujeita a flexão positiva e negativa [3].	38
4.3	Curva segmentada e lisa equivalente.	38
4.4	Representação de uma curva lisa, sujeita a flexão negativa [51].	39
4.5	Representações dos deslocamentos na curva da figura 4.4 [51]. (a) vista da secção C-C, forma ovalizada da secção da curva; (b) detalhe do perfil deformado da secção transversal da curva.	39
4.6	Representação da secção do tubo ampliada, detalhe de variáveis sobre a espessura [51].	40
4.7	Deformações num elemento da parede da curva [50].	42
4.8	Representação esquemática de um tubo compósito.	45
5.1	Diferenciação entre curvas segmentadas de espaçamento curto e longo [3].	49
5.2	Geometria de uma curva segmentada simples.	51
5.3	Geometria de uma curva segmentada múltipla.	52
6.1	Geometria da curva segmentada em estudo.	53
6.2	Dimensões da curva segmentada em estudo.	54
6.3	Ilustrações do ensaio de compressão radial.	55
6.4	Representação esquemática do teste de compressão radial elaborado [4].	56
6.5	Resultados do ensaio de compressão radial.	57
6.6	Gráfico do módulo de <i>Young</i> em função do deslocamento.	57
6.7	Representação esquemática dos nós onde são aplicadas as condições de fronteira do problema.	59
6.8	Comparação entre a curva FD real e a obtida através da simulação por elementos finitos.	59
6.9	Materiais base, em bruto, para o fabrico de tubagem compósita [46].	61
7.1	Geometria do modelo do segmento completo.	63
7.2	Modelo da curva segmentada completa.	64
7.3	Número e pontos de integração de um elemento <i>S8R</i> [55].	65
7.4	Exemplo de aplicação da técnica de <i>edge seeding</i> , no modelo geométrico da curva segmentada.	66
7.5	Resultados gráficos da análise de convergência.	66
7.6	Exemplos de malhas de elementos finitos testadas.	67
7.7	Ilustração dos sistemas de coordenadas, base para as condições de fronteira e carregamento.	68
7.8	Representação esquemática da flexão de um tubo reto.	69
7.9	Geometria do modelo do tubo reto equivalente.	70
7.10	Definição da malha do tubo reto equivalente através das técnicas de <i>edge seeding</i> e <i>sweep meshing</i>	71
7.11	Ilustração dos sistemas de coordenadas, base para a definição das condições de fronteira e carregamento do modelo do tubo reto equivalente.	71
8.1	Vista lateral do conjunto de amarração.	73
8.2	Representação do conjunto experimental a construir.	74
8.3	Ilustração das linhas guia criadas na superfície do tubo.	75
8.4	Serra de fita <i>Optimum S 300 DG Vario</i>	76
8.5	Ilustração do posicionamento e corte do tubo na serra de fita.	76

8.6	Representação dos cortes efetuados no tubo e resultado final.	77
8.7	Ilustração das várias etapas do processo de soldadura.	78
8.8	Ilustração dos vários componentes constituintes do espécime de teste, estrutura final.	79
8.9	Ilustrações do espécime de teste no banco de ensaio.	80
8.10	Ilustrações do tipo de amarração entre o espécime de teste e o banco de ensaio. .	80
8.11	Resultados dos ensaios de flexão negativa.	81
8.12	Curvas úteis sobre a relação Força-Deslocamento dos ensaios de flexão negativa. .	81
8.13	Representação da curva segmentada em estudo.	82
9.1	Curvas Momento-Deslocamento Angular dos ensaios de flexão negativa.	83
9.2	Gráfico comparativo sobre a relação Energia de Deformação-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente.	84
9.3	Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente	85
9.4	Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica, numérica e experimentalmente.	85
9.5	Relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica e numericamente, para o caso do tubo reto equivalente.	86
9.6	Gráfico comparativo do fator de flexibilidade em função do <i>pipe factor</i> , de acordo com várias metodologias.	87
9.7	Fator de flexibilidade em função do <i>pipe factor</i> , para o caso de estudo, de acordo com várias metodologias.	88
9.8	Gráfico comparativo sobre a relação Energia de Deformação-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente.	90
9.9	Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente.	91
9.10	Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica e numericamente.	91
9.11	Relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica e numericamente, para o caso do tubo reto equivalente.	92
9.12	Gráfico comparativo dos fatores de flexibilidade da curva metálica e compósita, em função do <i>pipe factor</i> , obtidos através das metodologias analíticas respectivas. .	93
9.13	Relação $K - \phi$, obtida através do modelo analítico compósito.	94
9.14	Gráfico comparativo entre os fatores de flexibilidade da curva metálica e compósita para o caso de estudo.	94

Lista de Símbolos e Acrónimos

E	Módulo de Young/Elasticidade
E_z	Módulo de <i>Young</i> na direção axial de um elemento tubular compósito
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal
E_2	Módulo de elasticidade transversal
E_θ	Módulo de <i>Young</i> na direção tangencial de um elemento tubular compósito
G	Módulo de Corte
$G_{z\theta}$	Módulo de corte na direção axial-tangencial de um elemento tubular compósito
K	Fator de Flexibilidade
R	Raio de um ponto no plano médio da secção original, em relação ao centro de curvatura da curva tubular
R'	Raio do perfil deformado da secção transversal de uma curva tubular
R_0	Raio de curvatura de uma curva tubular
U	Energia de deformação
U_x	Energia de deformação, na direção axial
U_θ	Energia de deformação, na direção radial
U_{min}	Energia de deformação mínima
α_0	Define metade do ângulo de curvatura de uma curva tubular
ϵ_θ	Deformação radial de um elemento da curva lisa
ϵ_x	Deformação axial de um elemento da curva lisa
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
$\nu_{z\theta}$	Coefficiente de <i>Poisson</i> na direção axial-tangencial de um elemento tubular compósito
\overline{M}	Momento fletor necessário para produzir um incremento angular da extremidade da curva tubular, de $d\alpha_0$
dR	Incremento do raio R , devido à deformação de ovalização
$d\alpha_0$	Incremento angular da extremidade da curva tubular, devido à ação de um momento fletor
r	Raio médio de uma curva tubular
t	Espessura da parede de uma curva tubular

v	Deslocamento tangencial do plano médio da curva tubular
w	Deslocamento radial do plano médio da curva tubular
z	Distância de um elemento ao plano médio do tubo, na direção da espessura
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
CCP	Centrifugal Casting Process
CFW	Continuous Filament Winding
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DFW	Descontinuous Filament Winding
DIN	Deutsches Institut für Normung
GRP	Glass Reinforced Polimer
ISO	International Organization for Standardization
NEN	Nederlands Normalisatie-Instituut
PVC	Cloreto de Polivinila
PVC	Policloreto de vinila
UA	Universidade de Aveiro

Estrutura da Dissertação e Objetivos

Este trabalho compreende o desenvolvimento de uma metodologia de cálculo do fator de flexibilidade (K) de curvas compostas por segmentos lineares, construídos a partir do corte em ângulo de tubos retos, posteriormente ligados de forma a se obter a geometria final pretendida.

O fator de flexibilidade pode ser entendido como o rácio entre o momento necessário à flexão de um elemento de tubagem curva (\bar{M}) e o momento fletor capaz de produzir a flexão de um tubo reto equivalente, para um dado incremento angular ($d\alpha_0$) do plano transversal das suas extremidades, ou seja, indica quantas vezes mais flexível é o tubo curvo, em relação a um tubo reto com o mesmo comprimento, diâmetro e espessura.

O objetivo principal trata-se de conseguir aproximar este fator de flexibilidade para curvas de material compósito, uma vez que esta se trata de uma lacuna na bibliografia existente, que na sua maioria se refere a estudos de flexibilidade de curvas segmentadas de material metálico.

Esta dissertação é composta por nove capítulos. A seguir são apresentados, de forma mais concreta, os objetivos da mesma por fase de desenvolvimento.

Capítulo 1 - Estrutura da Dissertação e Objetivos

Este capítulo destina-se à descrição da forma como a dissertação está organizada segundo os seus capítulos constituintes, procurando dar um sentido claro e inequívoco à exposição da informação adquirida durante este estudo, desde a recolção do estado do conhecimento, organização dos modelos numéricos de aproximação ao comportamento estrutural e confirmação experimental dos resultados alcançados.

Neste capítulo são também descritos os objetivos a atingir nas diversas etapas da dissertação, em particular ao nível da metodologia implementada no cálculo do fator de flexibilidade, em termos analíticos e com base na simulação por elementos finitos, e a sua validação.

Capítulo 2 - Introdução

Este capítulo serve o propósito de contextualizar o trabalho de investigação e o seu objeto de estudo. Aqui são descritas as razões pelas quais as curvas segmentadas se tomam como a solução preferencial, a partir de diâmetros relativamente grandes, ao invés de curvas lisas. É também aqui observada a importância dos materiais compósitos em instalações de tubagens, tanto em ambiente industrial como no caso do transporte a grandes distâncias de recursos energéticos e naturais, no estado líquido ou gasoso. São também apontadas as principais limitações e vantagens do uso destes materiais, no contexto dos sistemas de tubagens, de acordo com a sua aplicação.

Capítulo 3 - Estado da Arte

Aqui é feita uma revisão aprofundada sobre os estudos mais importantes realizados sobre o comportamento mecânico de curvas segmentadas e as metodologias desenvolvidas.

Deste capítulo consta ainda uma revisão tecnológica sobre os métodos de fabricação de tubagem em material de natureza compósita onde se pretende avaliar os tipos de tecnologias existentes no que toca à produção de elementos curvos segmentados compósitos.

Capítulo 4 - Metodologia de Cálculo Analítico da Flexibilidade

Neste capítulo descreve-se a metodologia desenvolvida para caracterizar as curvas, metálica e compósita, quanto ao seu fator de flexibilidade. Esta fase implica as seguintes etapas:

- (a) Definição dos pressupostos teóricos inerentes ao tipo de solução procurada, neste caso, assente na teoria geral das cascas, apresentada por *S. Timoshenko et al* [1];
- (b) Obtenção do fator de flexibilidade para curvas segmentadas em material metálico e compósito, através do desenvolvimento de um método energético, frequentemente adotado para o cálculo de flexibilidade e tensão de tubagens curvas, primeiramente estudado por *von Karman* [2].

Capítulo 5 - Normas e outras Metodologias Sobre o Cálculo do Fator de Flexibilidade

É parte integrante deste capítulo a apresentação de diversos códigos ou normas internacionais nos quais são introduzidas metodologias de cálculo do fator de flexibilidade, nomeadamente aquelas afetas ao código *ANSI/ASME B31.8*, *NEN 3650* e a metodologia proposta por *Gresnigt* [3]. O objetivo deste capítulo passa pela construção de uma base de comparação entre as várias metodologias existentes e a apresentada neste trabalho.

Capítulo 6 - Caso de Estudo: Curva Segmentada Sujeita a Flexão Negativa no Plano da Curva

É aqui realizada a caracterização geométrica da curva segmentada em termos das suas dimensões e definição dos parâmetros inerentes aos materiais que constituem a peça, o que passa pela:

- (a) Definição do módulo de elasticidade (E) do material metálico, recorrendo a um ensaio de compressão radial de um provete tubular cilíndrico. A solução é obtida de acordo com os textos de *Young et al* [4], baseado em estudos de *Yuan et al* [5];
- (b) Definição do material compósito, quanto aos seus módulos de elasticidade, longitudinal (E_1) e transversal (E_2), coeficientes de poisson (ν) e módulos de corte (G), de acordo com as características de um compósito do tipo *E-Glass/E*, usual em tubagens de transporte de recursos petroquímicos e de gás natural [6].

Capítulo 7 - Simulação Numérica Por Análise de Elementos Finitos

Este capítulo compreende a definição do modelo de elementos finitos afeto à simulação em *software* próprio, realizando as seguintes subetapas:

- (a) Modelação da curva segmentada metálica, no *software* comercial *Abaqus CAE 6.10*, usando as definições materiais anteriormente obtidas e após a correta definição das condições de fronteira e carregamento, as quais devem obedecer aos pressupostos teóricos assumidos;
- (b) Modelação do tubo metálico reto equivalente, sujeito às mesmas condições de fronteira e carregamento da curva segmentada;

- (c) Dos dois modelos referidos obtém-se os valores dos momentos e energias de deformação, para uma dada rotação prescrita, a qual provoca uma diminuição do ângulo de curvatura da curva no seu plano de trabalho;
- (d) Obtenção dos fatores de flexibilidade da curva, dividindo o momento ou energia de deformação do tubo reto equivalente pelos respetivos valores obtidos para o caso da curva segmentada;
- (e) Os passos anteriores são então repetidos, mas desta vez usando as definições do material compósito.

Capítulo 8 - Análise Experimental

É parte integrante deste capítulo a descrição de todo o procedimento experimental, desde a forma como é construído o conjunto de prova metálico para análise na máquina de ensaios de tração, quais as grandezas medidas, de que forma estas são obtidas e como as mesmas são analisadas e transformadas em resultados passíveis de ser comparados com os obtidos nas fases anteriores. A conclusão desta fase depende da bem sucedida execução das seguintes tarefas:

- (a) Construção da geometria da curva segmentada, por corte em ângulo de um tubo reto e posterior soldadura das suas partes constituintes;
- (b) Realização do ensaio mecânico no banco de ensaios *Shimadzu*, parte integrante do laboratório de mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro (UA), obtendo uma curva Força-Deslocamento característica do sistema ensaiado;
- (c) Análise e tratamento dos dados obtidos, com o intuito de transformar as incógnitas da curva supradita para o par Momento-Incremento Angular.

Capítulo 9 - Apresentação de Resultados

Neste espaço são apresentados os resultados adquiridos através das metodologias numéricas e experimentais, apresentados nos capítulos 4-8, realizando-se uma comparação qualitativa dos mesmos.

Capítulo 10 - Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido e faz uma avaliação sumária dos objetivos inicialmente estabelecidos. No final são apontadas algumas direções para possíveis trabalhos futuros nesta área.

2

Introdução

Neste capítulo é dado um contexto histórico e económico sobre a importância dos sistemas de tubagens, apresentando as razões para a crescente introdução de materiais compósitos neste setor. No final avaliam-se as razões pelas quais as curvas segmentadas podem ser usadas em detrimento de curvas lisas.

2.1 Contexto Histórico

Historicamente, os Romanos foram os primeiros a introduzir o conceito de tubagem durante o século I d.C., neste caso para o transporte de água [7]. Os Romanos eram os mestres da engenharia na sua época, situando-se na vanguarda da tecnologia. Através de uma série de aquedutos, canais e canalizações de chumbo laminado, faziam chegar água proveniente de lagos, nascentes e rios, a uma vasta rede de aldeamentos e cidades que compunham o seu território. Usualmente, a água era primeiro centralizada e depois canalizada para fontes e banhos públicos, através de tubagens como a apresentada na figura 2.1-a.

A tecnologia inerente às tubagens, sempre dependente da tecnologia dos materiais, viveu um processo de lento desenvolvimento, desde o chumbo no período Romano até ao uso de ferro fundido e madeira na idade média. De facto, foi encontrada ainda em uso uma tubagem de madeira nos anos 1890 em Inglaterra, como a ilustrada na figura 2.1-c. Com a chegada da tubagem de cobre no anos 30, a capacidade de introduzir sistemas de tubagens em propriedades novas e antigas tornou-se acessível à maioria das pessoas, mantendo-se como a tubagem de escolha até tempos recentes [7].

Corria o ano de 1926, quando o tubo de policloreto de vinila (PVC) conhecia a luz do dia, no entanto, apenas durante os anos 40 é que este começou a ser comercializado, sendo usado extensivamente na reconstrução da Alemanha e Japão, no rescaldo da 2^a Guerra Mundial. Hoje em dia, devido à subida dos preços do cobre e ao desenvolvimento tecnológico relacionado com as tubagens poliméricas, estas últimas passaram a ser a norma na maioria das novas construções e empreendimentos civis [7].



(a) Tubagem de chumbo, Romanos (séc.I d.C.) [7].



(b) Tubagem cerâmica, Romanos e medieval (séc.XV) [7].



(c) Tubagem de madeira, medieval (séc.XV) [7].



(d) Tubagem de aço laminado (séc.XIX) [7].



(e) Tubagem de cobre (séc.XX) [7].



(f) Tubagem de material polimérico (séc.XXI) [7].

Figura 2.1: Exemplos históricos de tubagens.

2.2 Contexto Económico

Como foi referido na secção 2.1, os sistemas de canalização experienciaram um desenvolvimento bastante lento, no entanto, desde o desenrolar da 2^a Guerra Mundial que o mundo conheceu os maiores avanços tecnológicos em todas as frentes, incluindo a tecnologia inerente aos materiais e técnicas de produção de tubagem. De facto, com o aumento exponencial da procura de recursos energéticos de origem fóssil desde essa altura, chegou também a necessidade de os transportar a muito grandes distâncias, provocando o desenvolvimento de sistemas

de transporte internacional de fluidos, as chamadas *pipelines*, na sua denominação inglesa.

Segundo *Patrick Laney* [6], após a 2^a Guerra Mundial, a indústria de gás natural cresceu a uma taxa bastante agressiva, tendo sido construídos cerca de 917000km de *pipeline* num período de 40 anos, entre 1948 e 1999. De acordo com o mesmo autor, a procura por instalações de *pipeline* irá continuar a aumentar em cerca de 2% ao ano até 2020, mesmo tendo em conta a crise na indústria petrolífera e o declínio dos preços do gás natural.

Peritos na indústria do gás natural preconizam o aumento das pressões de operação, de forma a suprir a procura deste recurso e ao mesmo tempo ultrapassar o decréscimo dos preços do mesmo [6]. Assim, os engenheiros e projetistas de *pipelines* viram-se para os materiais compósitos como forma de melhorar o comportamento mecânico, segurança e fiabilidade das tubagens, simultaneamente diminuindo os custos de manutenção e substituição das mesmas.

Com efeito as tubagens personificam as artérias e veias de nações de todo o mundo, transportando todo o tipo de fluidos, como petróleo, água, gás natural, entre outros, que são a vida da civilização moderna. Economias em desenvolvimento investem ativamente em novas infraestruturas e economias estabelecidas, como a Europa e os Estados Unidos, possuem uma grande necessidade de substituição dos seus sistemas de *pipelines* [8].

A procura mundial de tubagem foi estimada em cerca de 186 biliões de dólares (\$186bn) em 2010, com um crescimento anual na ordem dos 10.6% desde 2001, comparado com um aumento de 13.6% ao ano na procura de tubagem de fibra de vidro [8].



Figura 2.2: Visão sobre o mercado mundial de tubagem em 2010 [8].

A pirâmide invertida, ilustrada na figura 2.2, mostra uma visão geral do mercado de tubagem em 2010, de onde se pode retirar que a procura de tubagem de grande diâmetro, superior a 150 mm, foi cifrada em cerca de \$127bn, ou seja, 68% da procura mundial total. A procura mundial passível de ser atribuída a tubagem em materiais compósitos é cerca de \$103bn, 80% de toda a procura de tubagem de grande diâmetro, no entanto, apenas 5%, \$4.5bn, dessa procura é realmente suprimida pela implementação de tubagens compósitas, pelo que se percebe claramente o enorme potencial para o crescimento de empresas produtoras de tubagem compósita, particularmente empresas dedicadas à construção de tubagem Polimérica Reforçada por Fibra de Vidro, do inglês *Glass Reinforced Polymer* (GRP).

2.3 Aplicações Por Setor

A indústria de tubagem assume uma importância fulcral nos dias que correm, pois fornece os seus produtos a todo e qualquer tipo de atividade, todas elas vitais para o funcionamento das sociedades modernas. São apresentados em baixo alguns exemplos dos setores servidos pela indústria de tubagem, metálica e/ou compósita [8].

- **Petróleo e Gás** - Ao serviço de companhias de exploração de petróleo e gás natural, os seus usos compreendem:
 - (a) Transmissão de crude;
 - (b) Linhas de injeção e de fluxo;
 - (c) Tubagens que servem as refinarias e plataformas no alto mar, como a ilustrada na figura 2.3;
 - (d) Tubagem vertical para poços de injeção e produção;
 - (e) Tanques de armazenamento e tubagem submersa.



Figura 2.3: Plataforma petrolífera brasileira P-51 [9].

- **Distribuição de água** - Ao serviço de governos, municípios e companhias de utilidades, sistemas de tubagens são empregues na:
 - (a) Transmissão internacional de água (ver figura 2.4);
 - (b) Irrigação e distribuição municipal de água potável.



Figura 2.4: Foto aérea de um aqueduto de transferência de água não tratada [10].

- **Infraestruturas públicas** - Ao serviço de governos e municípios, sistemas de tubagens são usados no:
 - (a) Aquecimento e arrefecimento de edifícios públicos;
 - (b) Redes de esgotos e drenagem de água das chuvas;
 - (c) Estações de tratamento de águas residuais;
 - (d) Redes de água de combate a incêndios.
- **Indústria (geral)** - Sistemas de tubagens servem todo o tipo de complexos e aplicações industriais, como mineração, dragagem e fábricas de produção de alumínio, ao nível de:
 - (a) Sistemas de arrefecimento de água;
 - (b) Coletores de incêndio;
 - (c) Tubagem aplicada aos processos de produção industrial, como no exemplo ilustrado na figura 2.5;
 - (d) Esgotos industriais;
 - (e) Tanques de armazenamento.



Figura 2.5: Rede de tubagens industriais [8].

- **Dessalinização e Energia** - Sistemas de tubagens servem governos, empresas do setor energético e companhias de dessalinização, ao nível de:
 - (a) Sistemas de arrefecimento e admissão de água;
 - (b) Dessulfurização de gases de combustão;
 - (c) Tubagem associada ao processo produtivo;
 - (d) Sistemas de transporte de água do mar.
- **Indústria petroquímica** - Ao serviço de companhias petroquímicas, o uso de tubagens compreende, entre outros:
 - (a) Poços químicos;
 - (b) Sistemas de água de arrefecimento e de combate a incêndios;
 - (c) Tubagem ligada ao processo de produção;

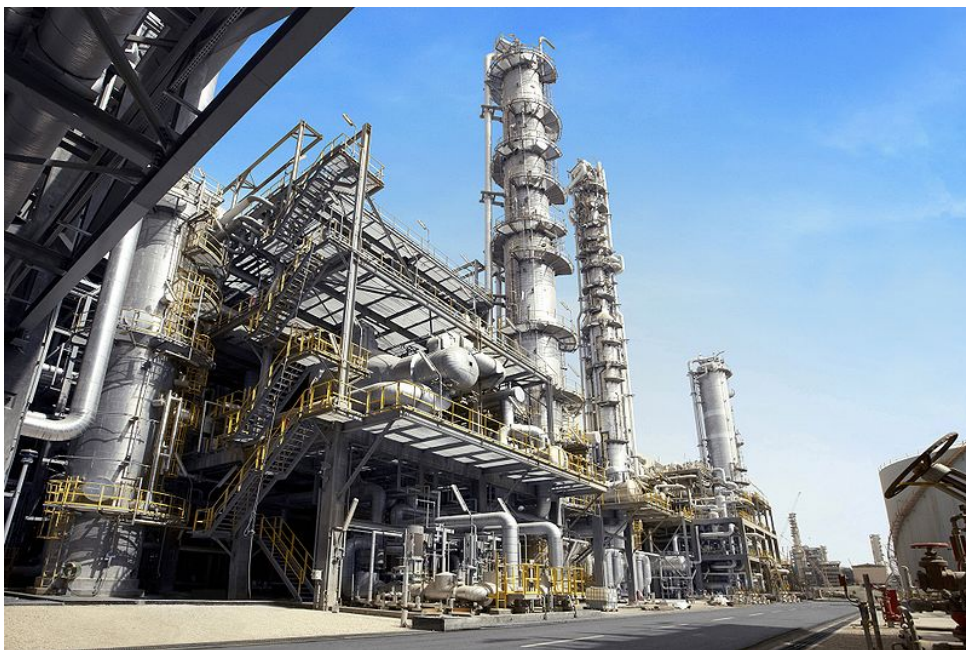


Figura 2.6: Instalação fabril petroquímica localizada na Arábia Saudita [11].

2.4 Materiais de Construção de Tubagens

Pelo que foi já referido, pode constatar-se a importância da indústria de tubagem e como aspetos financeiros e macroeconómicos influenciam este setor, de tal forma que a procura pela implementação de materiais que representem um desempenho mais favorável que os de natureza metálica se torne muito apetecível. É neste contexto que são introduzidos os materiais compósitos na construção de tubagens, os quais, como qualquer outro material, apresenta vantagens e desvantagens em relação às tubagens de construção metálica.

De um modo geral, as vantagens do uso de materiais compósitos em relação aos metálicos, em sistemas de tubagens, podem se resumir aos seguintes pontos.

- Elevado rácio de resistência-peso, o que conduz a uma diminuição dos custos associados ao transporte e instalação em cerca de 1/4 em relação aos produtos metálicos e até 1/10 quando comparado com tubagens de betão [8];



(a) Corrosão no interior de um tubo metálico [8].



(b) Corrosão provocada por ambiente salino [8].

Figura 2.7: Exemplos ilustrativos de efeitos corrosivos em tubagens metálicas.

- Excelente resistência à corrosão, sendo por isso capaz de transportar compostos químicos corrosivos, incluindo ácido sulfúrico [6], para além de resistir a ambientes salinos. Esta característica revela toda a sua importância quando se comparam os tempos de vida e necessidades de substituição deste tipo de tubagens em relação às metálicas. A figura 2.7 ilustra claramente o efeito que condições de funcionamento impróprias e ambientes adversos podem provocar em instalações com produtos metálicos;
- Melhor eficiência hidráulica, ou seja, maior eficiência no transporte de fluidos, dada a menor rugosidade superficial em tubagem compósita;
- Menor densidade, responsável por uma diminuição significativa dos custos com o transporte e manuseamento no local de instalação;
- Material não condutor de eletricidade, que é um fator positivo em termos de segurança de qualquer tipo de instalação fabril;
- Natureza ortotrópica, possibilitando um projeto inteiramente à medida das necessidades do cliente;
- Grande versatilidade geométrica e dimensional, pelo que é possível obter uma infinidade de juntas e acessórios para aplicações subterrâneas ou acima do solo. Além disso, existem tubagens compósitas enroláveis em bobinas, ou do inglês *spoolable*, que facilitam o transporte e processo de instalação no local;

- Finalmente, e mais em sintonia com a temática desta dissertação, os materiais compósitos são significativamente mais flexíveis que os metais, o que combinado com um coeficiente de expansão térmica mais reduzido [6], possibilita um projeto de instalações com menor número de juntas ou *loops* de expansão. Este facto pode levar a uma razoável redução do custo de instalação e projeto de *pipelines*.

Contudo, a aplicação de tubagens compósitas alberga também um conjunto de desvantagens, as quais acarretam implicações ao nível do projeto da instalação. A maior flexibilidade dos GRP pode tornar-se uma desvantagem, na medida em que a instalação requer um espaçamento mais curto dos elementos de suporte da canalização e a mesma está sujeita a oscilações graves com mais facilidade [12].

As tubagens construídas à base de GRP possuem, geralmente, menor resistência longitudinal que tubagens metálicas, pelo que se torna necessário precaver o efeito de batimento hidráulico severo e requerem um suporte mais exaustivo de válvulas pesadas [12].

Os materiais compósitos possuem um comportamento plástico reduzido e bastante negativo, quando comparado com o que acontece com os materiais metálicos, razão pela qual é forçosamente necessário evitar cargas concentradas.

Além disso, deve-se ter cuidado com a temperatura de operação destes materiais, que deve ser mantida dentro de uma gama de valores admissíveis, pois a sua resistência e rigidez decrescem bastante a partir dos $95^{\circ}C$ [12].

2.5 Normas Gerais

Existem várias normas e códigos desenvolvidos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), *American Water Works Association* (AWWA), *International Organization for Standardization* (ISO), *British Standards* (BS) e *Deutsches Institut für Normung* (DIN), que cobrem uma série de aplicações para tubagem GRP, incluindo transporte de água potável, águas residuais e agentes químicos. Apesar de existirem várias normas que abrangem este tipo de tubagens, estas são todas baseadas na performance da mesma, ou seja, normalizam a qualidade necessária a uma dada aplicação. A tabela 2.1, em baixo, apresentam-se algumas das normas mais importantes nesta área.

Tabela 2.1: Normas aplicáveis a tubagens, com ou sem pressão.

Norma	Diretiva	Aplicação
ASTM	D3262	Tubagem para águas residuais sem pressão
ASTM	D3754	Tubagem para águas residuais sob pressão
AWWA	C950	Tubagens reforçadas por fibra de vidro, para água potável sob pressão
AWWA	M-45	Guia de projeto de tubagem reforçada por fibra de vidro
ISO	0639.3	Tubagem para água potável, com ou sem pressão
DIN	16869	Tubagens de resina de poliéster reforçada por fibra de vidro
BS	5480	Tubagens e acessórios para aplicações de água potável e residual

2.6 Curvas Segmentadas

Apesar de já ter apresentado razões suficientes para que se compreenda a crescente introdução e implementação de tubagens produzidas em materiais compósitos, nomeadamente compósitos de resina de epóxico reforçada por fibra de vidro, substituindo gradualmente as fabricadas em metal, ainda não foram expostos os motivos pelos quais as curvas segmentadas são usadas em detrimento das curvas lisas. Por lisas entendam-se curvas não segmentadas e portanto contínuas.

De facto, curvas segmentadas possuem desvantagens relativamente óbvias em relação a curvas lisas. Desde logo se percebe que as características do escoamento neste tipo de curva são inferiores e portanto implicam maior perda de carga no transporte de fluidos. O facto de se tratar de um elemento descontínuo por natureza, dado ser constituído por dois ou mais subelementos, acarreta implicações ao nível estrutural, pois estas discontinuidades representam zonas de concentração de tensões onde pequenos defeitos podem tomar contornos graves de deficiência estrutural e levar à falha do elemento na instalação.

Assim, para tubagens metálicas de pequenos diâmetros, inferiores a 150mm , devem usar-se curvas lisas de forma a evitar os problemas descritos acima. Este tipo de curvas pode ser obtido por vários processos de conformação, a quente ou a frio, de entre os quais se destacam a flexão por aríete, flexão por tração rotativa, encurvamento auxiliado por mandril e flexão em três pontos rotativos. A figura 2.8 apresenta estas formas de curvar tubo, sendo que todas elas são processos a frio.



Figura 2.8: Métodos de conformação de tubos retos em curvas lisas (processos a frio).

No entanto, estes processos não são de todo perfeitos, uma vez que fazem uso da plasticidade do material para lhe conferir a forma pretendida. Analisando a figura 2.9, durante o processo de flexão do tubo, o seu plano neutro, representado pela linha L_0 , aproxima-se da superfície interna do mesmo, e como a tensão no material é proporcional à distância do plano médio para as superfícies exteriores, distância z , esta pode atingir níveis passíveis de provocar fendas na superfície exterior da curva, ou até a sua fratura [14].

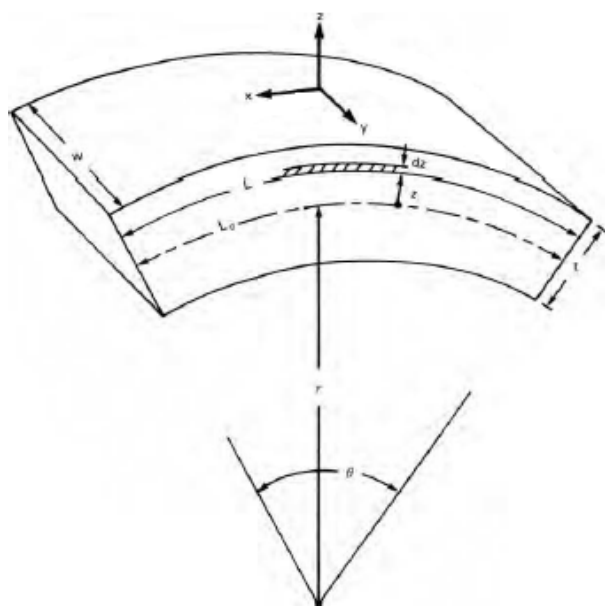


Figura 2.9: Representação do sistema de coordenadas de uma casca cilíndrica [14].

Além da referida questão, existe também o problema da diminuição da espessura da casca exterior da curva. Se se considerar que existem fibras, postas longitudinalmente em relação ao comprimento do tubo, na superfície exterior, interior e plano médio da casca, a fibra na superfície exterior estende-se mais do que a fibra da superfície interior é contraída. A fibra no plano médio também se estende, e dado que esta representa a extensão média da casca, implica que a espessura da mesma diminua, de forma a manter o volume constante [15]. Esta diminuição na espessura tem repercussões negativas, aquando da aplicação deste tipo de curvas sob pressão interna.

Curvas lisas são sem dúvida a escolha de eleição para curvas de pequeno diâmetro, no entanto, quando o tipo de aplicação, como as descritas na secção 2.3, exige o emprego de tubagens de grandes diâmetros, o fabrico de curvas lisas torna-se inoportável pelos métodos usuais e as curvas segmentadas ganham um argumento de peso a seu favor, o custo de produção.

Curvas segmentadas, para diâmetros elevados, representam uma forma mais económica de se obter este tipo de elementos de tubagens, tanto em material metálico como em compósito, sendo portanto de uso preferencial em relação às curvas lisas. No caso de tubagens compósitas, o fabrico de curvas lisas implica um investimento muito grande em equipamento capaz de executar o enrolamento filamentar em vários eixos, e a sua parametrização torna-se bastante mais complicada, pelo que a opção volta a recair nas curvas segmentadas. O processo de construção deste tipo de curvas é descrito no capítulo 3, para materiais compósitos, e no capítulo 8, para materiais metálicos.

Percebe-se agora toda a importância e envolvimento que o estudo de curvas segmentadas compósitas acarreta e a razão pela qual são o objeto de estudo desta dissertação.

3

Estado da Arte

A seguir é apresentado o estado da arte em relação a curvas segmentadas, composto por uma revisão literária e tecnológica.

3.1 Revisão Literária

Comparativamente às curvas “lisas”, o volume de literatura disponível para curvas segmentadas não é tão extenso e o seu domínio menos alargado. Contudo, uma revisão detalhada de todos os estudos publicados sobre curvas segmentadas é obviamente impossível no âmbito desta dissertação. A figura 3.1 mostra a distribuição temporal de publicações dentro desta temática, que como se pode observar tem vindo a diminuir desde a década de 60, sofrendo uma queda acentuada a partir da década de 90.

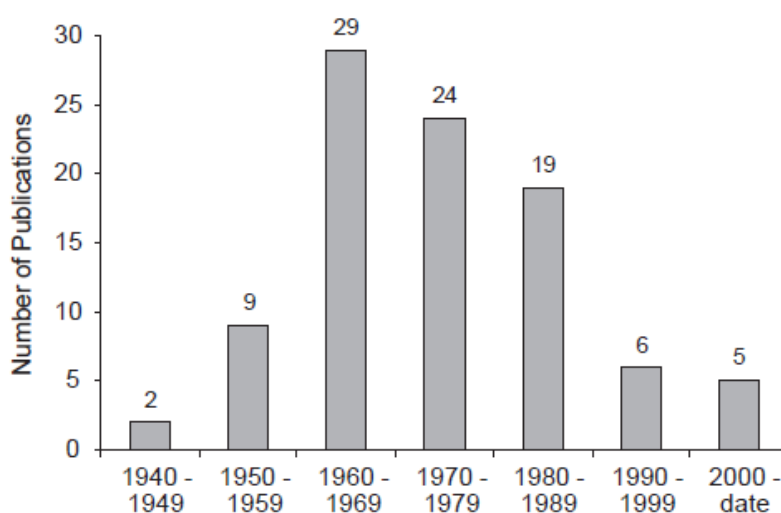


Figura 3.1: Publicações sobre curvas segmentadas [16].

Isto deve-se ao facto deste tipo de elemento não possuir uma aplicação tão vasta como o que se passa para curvas lisas, apesar da enorme importância em sistemas vitais para a sociedade moderna, conforme foi observado no capítulo 2. Assim, o principal objetivo desta revisão é apresentar os trabalhos teóricos, experimentais e com base em elementos finitos, mais importantes e relevantes no âmbito do presente estudo.

3.1.1 Análise Analítica e Experimental de Curvas Segmentadas

Muitos dos estudos teóricos iniciais eram claramente inovadores e estavam relacionados com o desenvolvimento e subsequente aperfeiçoamento de detalhes teóricos fundamentais, aos quais, muitas vezes, se seguiam comparações com dados obtidos experimentalmente.

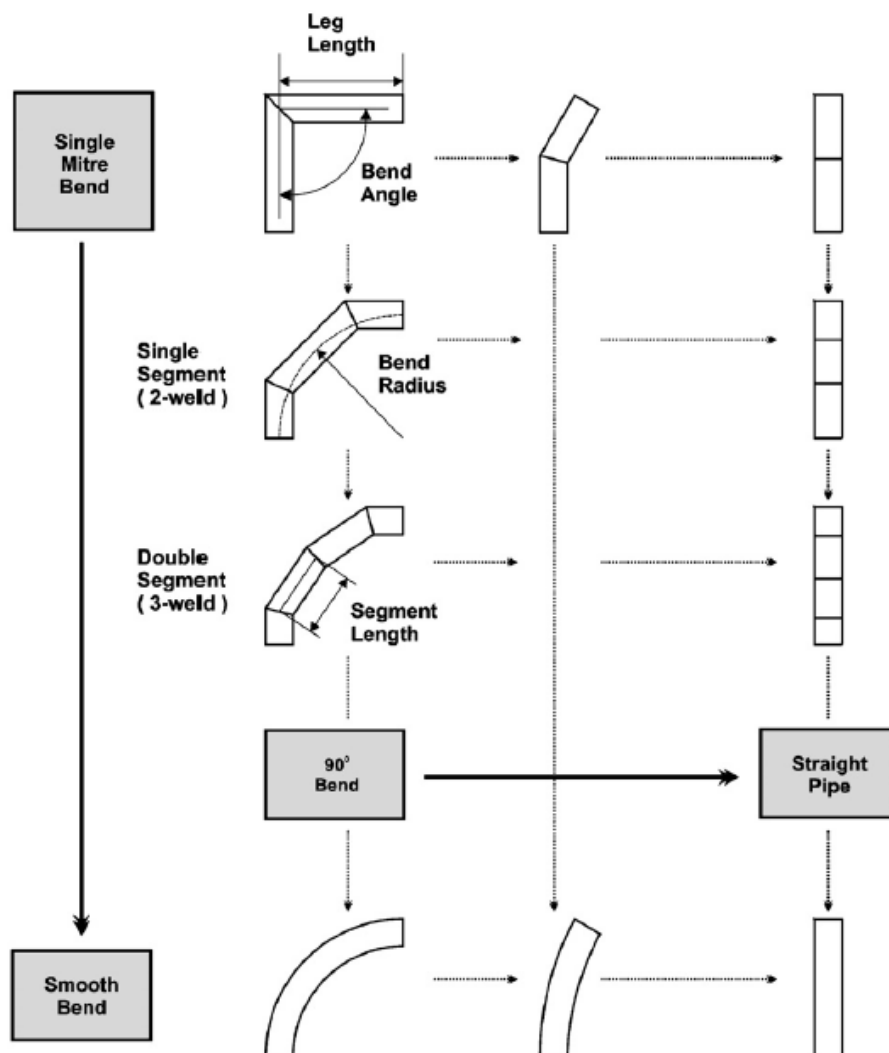


Figura 3.2: Espectro de análise de curvas segmentadas [16].

Como se depreende, da figura 3.2, as soluções de análise de curvas segmentadas convergem na direção de um tubo reto, com o aumento do ângulo de curvatura, e em direção a uma curva lisa, com o aumento do número de segmentos. Se o comprimento dos segmentos for suficientemente elevado, é permitida a análise de cada interseção como uma curva segmentada simples.

Além do ângulo de curvatura e número de segmentos, a pressão é outro parâmetro largamente estudado e o efeito combinado desta com carregamentos no e fora do plano da curva foi extensamente observado. Na sua tese de mestrado, *So* [17] levou a cabo testes sobre este mesmo efeito em duas curvas segmentadas simples, observando que a pressão provoca um aumento da rigidez da curva, mais significativo para curvas com um rácio *raio/espessura* mais elevado.

Bond [18] e *Bond e Kitching* [19] apresentaram resultados importantes de testes experimentais sobre curvas segmentadas sujeitas a flexão no e fora do plano da curva e vários níveis de pressão, comparando os resultados com os derivados da teoria produzida pelos mesmos autores. A aproximação teórica foi parecida à usada por *Rodabaugh e George* [20], na análise de curvas lisas. Os autores concluíram que o fator de flexibilidade não estava linearmente relacionado com

a pressão, e os fatores de concentração de tensão, provocados pela flexão da curva, se relacionavam com a pressão de forma similar ao fator de flexibilidade. Além disso, apurou-se que as tensões máximas, devidas ao momento fletor, não ocorriam necessariamente no mesmo local, ou na mesma direção, para todos os valores de pressão analisados. Os resultados obtidos através do seu desenvolvimento teórico foram comparados favoravelmente com os resultados de *Lane e Rose* [21].

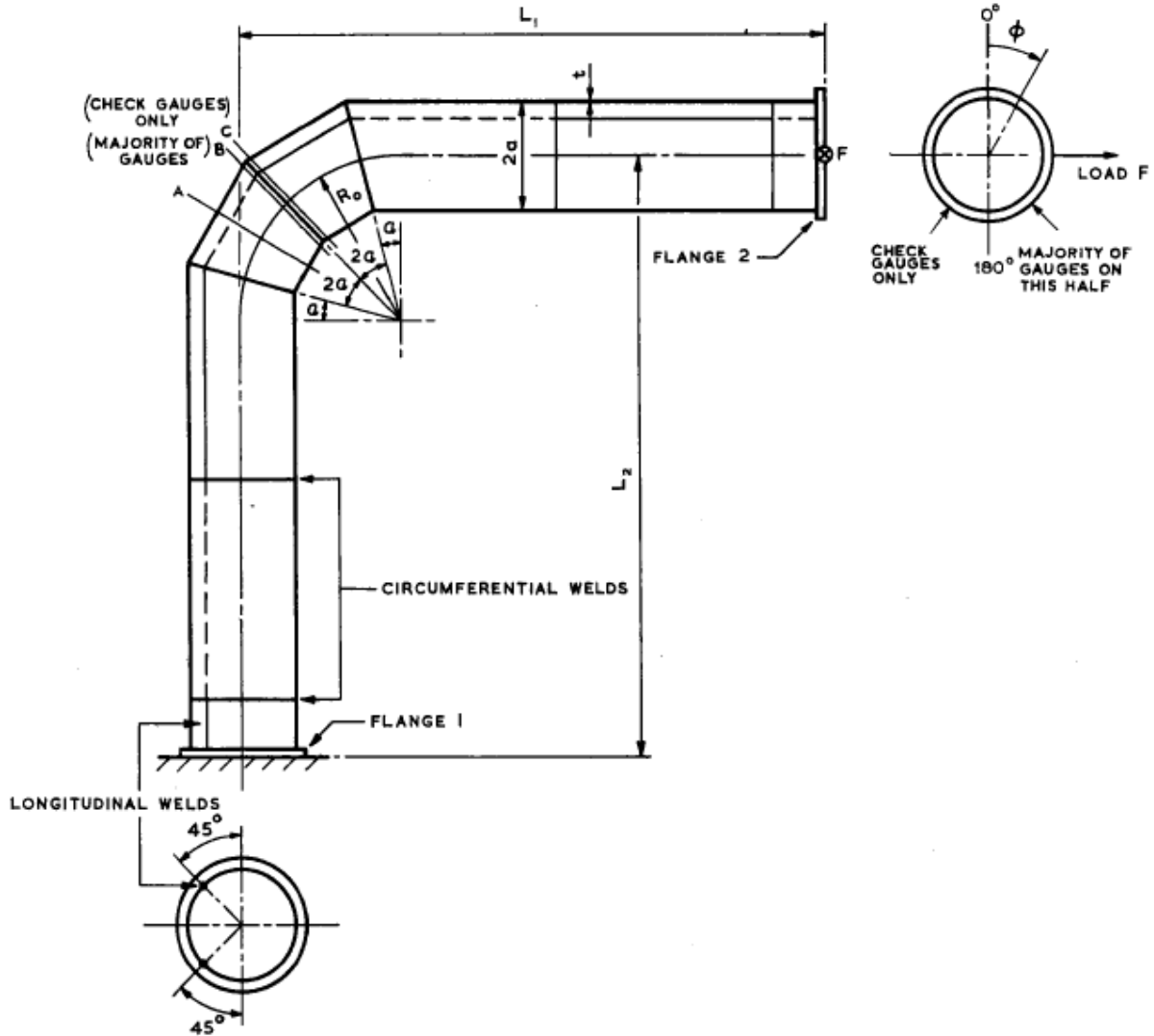


Figura 3.3: Representação de um teste experimental de flexão fora do plano da curva, realizado por *Bond e Kitching* [22].

Rodabaugh [23] discutiu o caso do carregamento combinado de pressão interna e momento fletor. Comparando os seus resultados com os obtidos por *Bond e Kitching* [19], concluiu que as expressões derivadas por *Rodabaugh e George* [20], sobre o efeito combinado deste tipo de carregamento, para curvas lisas, poderiam ser usadas na avaliação destes efeitos em curvas segmentadas. Este trabalho destaca a redução das tensões máximas e fator de flexibilidade com o aumento da pressão interna. O autor observou também que a aplicação do princípio de sobreposição, no sentido de combinar os resultados derivados dos efeitos de pressão e momento fletor, iria de facto sobrestimar as tensões na curva, especialmente para rácios *raio/espessura* elevados.

Em 1978, *Ingenhousz* [24] referiu, para uma curva segmentada simples de GRP a 90°, que a deformação devida a combinações de pressão interna e momento fletor, no e fora do plano da curva, foi aproximadamente igual à soma das deformações calculadas para cada caso de

carregamento em separado.

É importante dar ênfase às complicações que os efeitos estudados e observados nos parágrafos anteriores introduzem na análise de *pipelines*, pois são normalmente constituídas por tubagens com rácio *raio/espessura* elevado. O facto de a pressão normalmente provocar o decréscimo do fator de flexibilidade da curva, resulta no aumento do momento fletor, assim como das reações nos apoios, a atuar na mesma.

Mais recentemente, *Gresnigt* [3] estudou o comportamento elástico e plástico de curvas segmentadas simples, com dois ângulos de curvatura e rácios *raio/espessura* diferentes, com ou sem pressão, sujeitos a um momento fletor no plano da curva. Apesar de este autor não discutir o efeito de não-linearidade provocado pela pressão interna, existem diferenças significativas nos fatores de flexibilidade, fatores de intensificação de tensão e capacidade de deformação das curvas, quando sujeitas a níveis de pressão diferentes. O autor refere também que curvas segmentadas possuem uma capacidade de deformação significativamente mais elevada que tubos retos equivalentes.

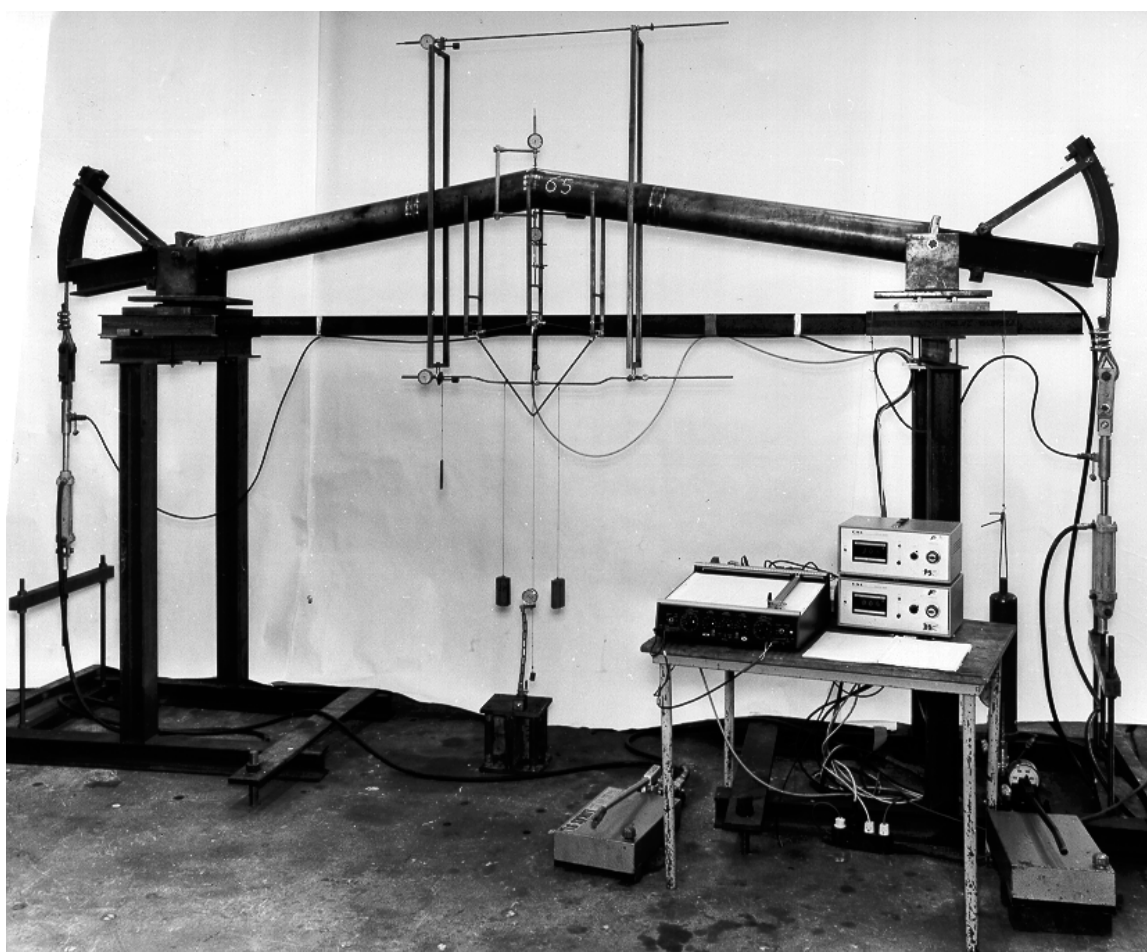


Figura 3.4: Teste experimental de flexão no plano da curva, realizado por *Gresnigt* [3].

Da observação de trabalhos iniciais, como os referenciados acima, é aparente a grande similaridade entre o desenvolvimento teórico de curvas lisas e segmentadas, dada a semelhança do comportamento básico destes dois tipos de elementos curvos. Ambos elementos sofrem um aumento da sua flexibilidade e níveis de tensão devido à ovalização da secção, embora as curvas segmentadas tenham uma complexidade acrescida devido ao efeito de concentração de tensões na intersecção dos segmentos, que por seu turno se refletem negativamente no comportamento à fadiga de toda a curva.

Trabalhos teóricos iniciais, assumiam que um segmento não reforçado da curva apresenta

ovalização constante ao longo da sua geratriz. Mais tarde, esta condição foi suavizada através da introdução de expansões em série que permitiam o decaimento da ovalização da secção da curva, postulando a existência de comprimentos, longo e curto, de declínio da ovalização. Deste desenvolvimento resultou uma melhoria na correlação da teoria com os dados experimentais e tornou possível ter em conta diferentes efeitos de bordo nas extremidades da curva, consoante as condições aplicadas nestes pontos.

Os dois fatores que mais influenciam a flexibilidade de tubagens curvas, e consequentemente as tensões que se desenvolvem, são a localização das flanges nas extremidades da curva e o comprimento dos tubos tangentes à mesma.

Markl [25], observou que flanges diretamente ligadas às extremidades de um elemento curvo cancelam grande parte da flexibilidade inerente a esse elemento. O autor sugeriu que o efeito dos tubos tangentes era de reduzida importância, tal como se pode comprovar através de resultados obtidos por *Kitching e Hose* ilustrados na figura 3.5, devendo-se usar tubos tangentes com comprimentos iguais ou superiores a 2 vezes o diâmetro da tubagem, entre a curva e outros elementos, como flanges ou pontos de ancoragem, de forma a se aproveitar toda a flexibilidade intrínseca à curva.

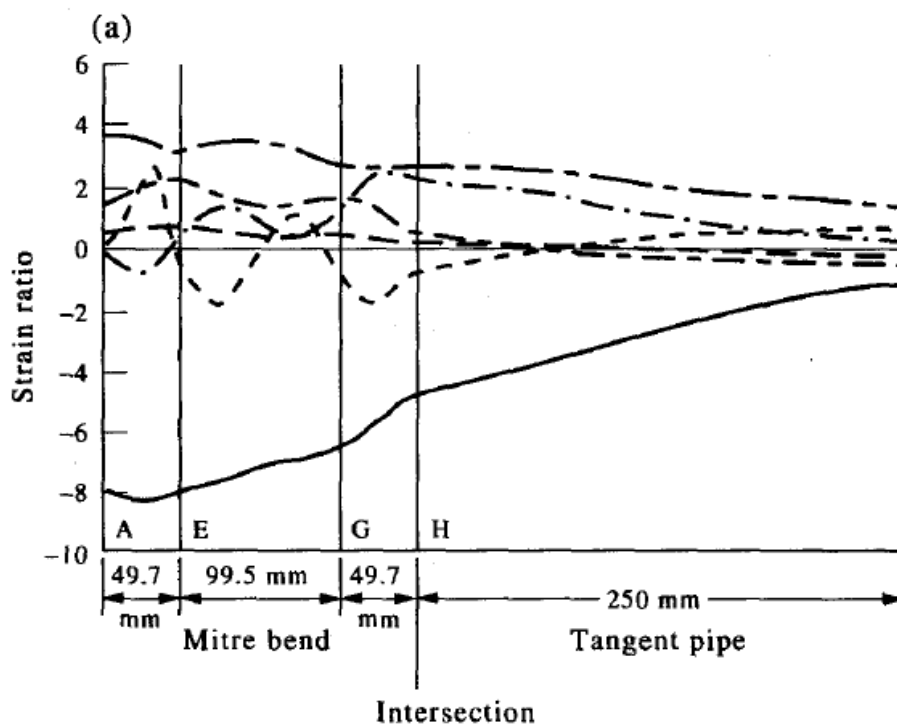


Figura 3.5: Tensões em curva de 90° sujeita a flexão. Teste realizado por *Kitching e Hose* [26].

Bond [27], considerou o efeito do comprimento de tubos tangentes em curvas segmentadas, sugerindo uma expressão para o cálculo do comprimento necessário, para que o efeito de elementos, como flanges, possa ser negligenciado. Um ano mais tarde, *Kitching e Thompson* [28] levaram a cabo uma extensa investigação sobre os efeitos do comprimento de tubos tangentes na flexibilidade de curvas segmentadas simples, não reforçadas.

Estudos mais recentes, naturalmente, contém teorias mais refinadas, que no geral melhoram a sua comparação com resultados experimentais. É opinião de *Wood* [16], que a relevância direta destas teorias na indústria é questionável, no entanto, deve ser reconhecida a sua influência nos regulamentos e normas ao longo dos anos, e a sua contribuição, para a compreensão do comportamento mecânico deste tipo de elementos de tubagens em prática industrial, não deve ser subestimada.

Ao contrário dos desenvolvimentos teóricos, os extensos testes experimentais levados a cabo

ao longo dos anos, ainda são, na sua geralidade, altamente relevantes nos dias de hoje, principalmente no que toca à validação de modelos de elementos finitos. De facto, o exercício de aferição de modelos de elementos finitos, com dados experimentais de qualidade, é bastante valioso, tanto nesse aspeto como em termos da aprendizagem do engenheiro.

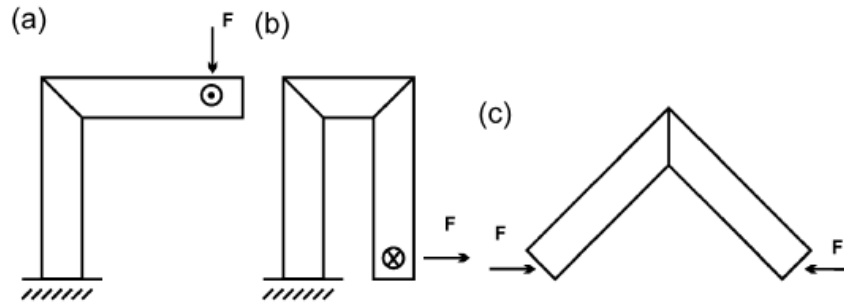


Figura 3.6: Arranjos experimentais típicos [16].

A figura 3.6 mostra alguns arranjos típicos de carregamento de conjuntos experimentais. Fica claro que em alguns casos, o carregamento não é simétrico relativamente ao plano de interseção dos segmentos. Em consequência, evidenciam-se campos de tensões diferentes em cada metade da curva, e em muitos casos, a intensão de submeter a curva a flexão fora do plano provoca também torção e corte nos segmentos da mesma.

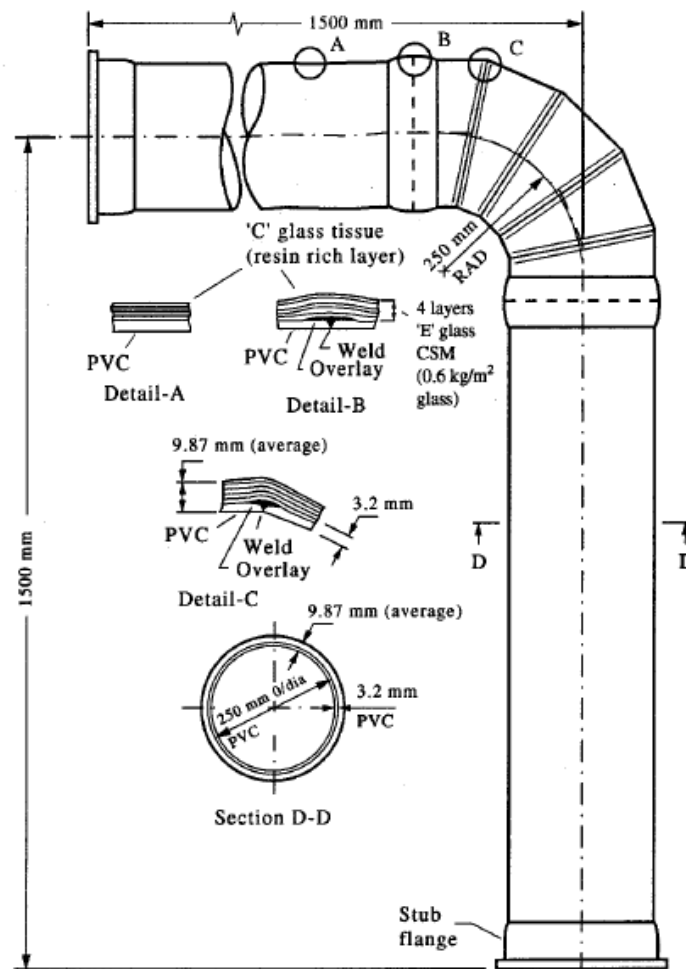


Figura 3.7: Conjunto construído para os testes de *Kitching e Hose* [26].

A análise de curvas segmentadas, fabricadas em materiais compósitos, apenas se pode complicar, quando comparada com a análise de curvas segmentadas de materiais isotrópicos. *Kitching e Hose* [26], avaliaram a distribuição de tensões em cinco curvas de 90° e de três segmentos, construídas em GRP, com uma camada de revestimento interior em cloreto de polivinila (PVC), sujeitas a pressão interna e flexão, no e fora do plano. A figura 3.7 ilustra a plataforma experimental implementada pelos autores. O processo de fabrico resultou numa variação de espessura ao longo da secção da curva, no entanto, os cálculos teóricos assumiam uma espessura constante. As comparações com os resultados experimentais foram razoáveis, como se pode observar a partir da figura 3.8, ainda assim, os autores observaram que uma variação de apenas 1%, do raio nominal da tubagem curva, pode induzir tensões de flexão severas, no caso de pressão interna.

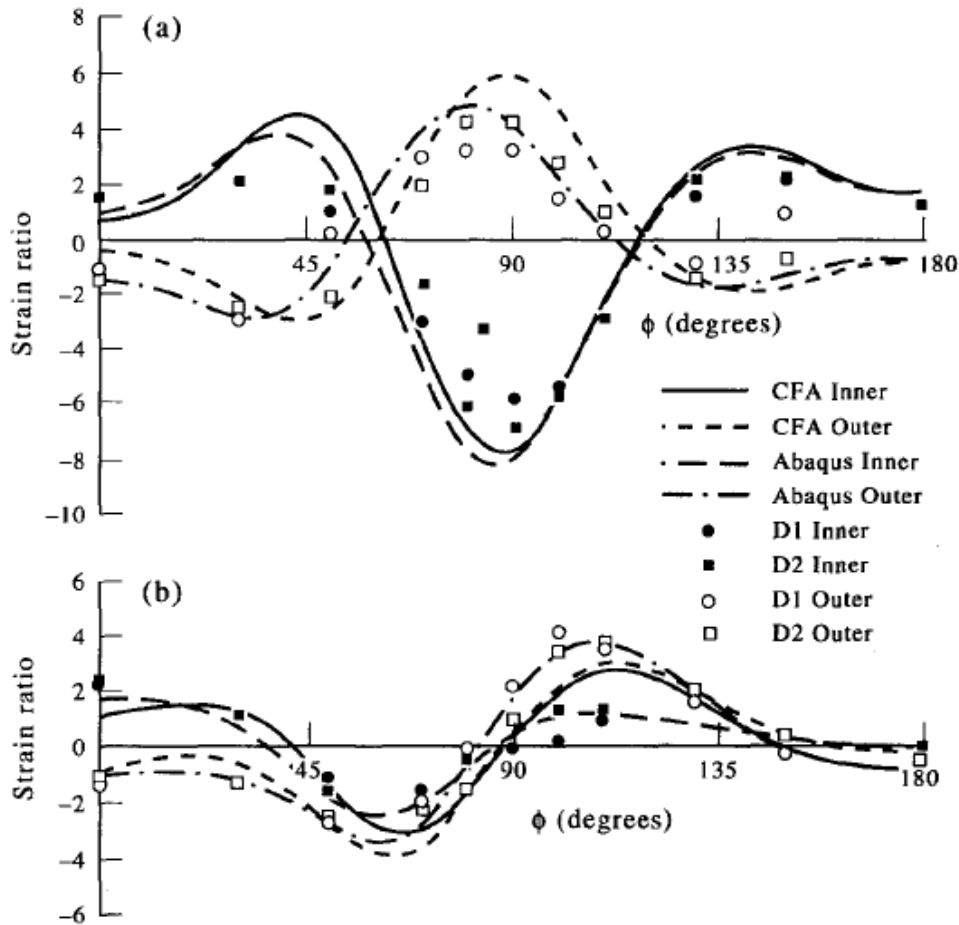


Figura 3.8: Comparação do campo de tensões, na secção AA (figura 3.7), obtidos durante os testes de *Kitching e Hose* [26]: (a) direção circunferencial; (b) direção longitudinal.

Xia et al [29], publicou, em 2001, uma solução elástica exata para as tensões e deformações de tubos compósitos, fabricados por enrolamento filamentar, sob pressão interna, baseada na teoria tridimensional de anisotropia elástica. O autor investigou as distribuições de tensões e deformações, para três ângulos de enrolamento das fibras, concluindo que, em tubos laminados, estas distribuições dependem fortemente da sequência de empilhamento.

Em 2002, *Queirós de Melo et al* [30] apresenta uma formulação semi-analítica, baseada em séries trigonométricas de Fourier, de forma a solucionar o problema de flexão no plano de curvas lisas. O campo de deslocamentos é calculado através de séries de Fourier, de forma modelar a ovalização da secção da curva. Neste estudo, são observadas algumas discrepâncias entre os fatores de flexibilidade calculados e os obtidos através da implementação da norma da ASME, em especial para o caso de curvas com flanges rígidas nas extremidades (ver figura 3.9).

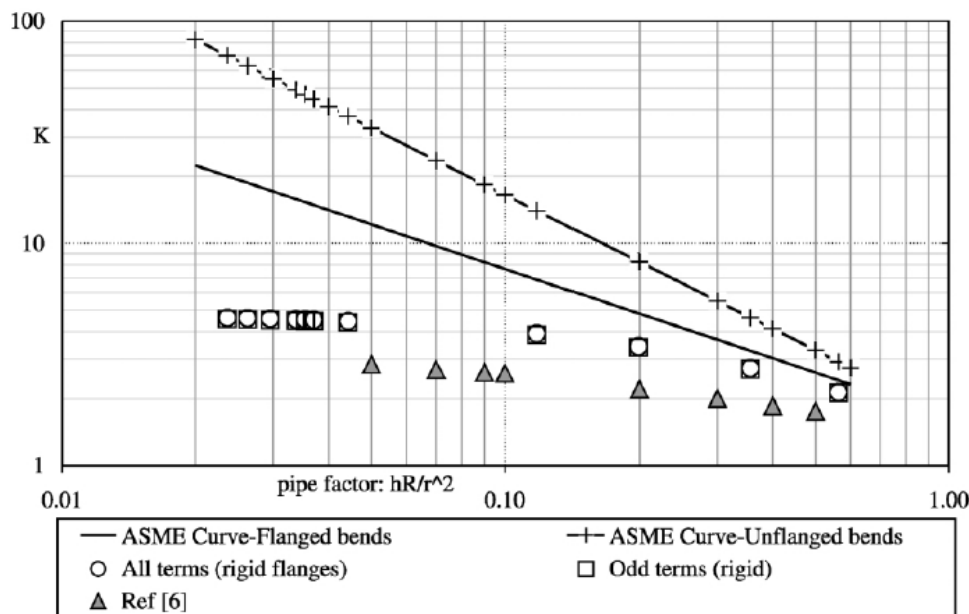


Figura 3.9: Comparação de fatores de flexibilidade, calculados por *Queirós de Melo et al* [30].

3.1.2 Elementos Finitos

Segundo *Wood* [16], já desde 1970 que *Sobieszczanski* [31] deixou a nota de que o método dos elementos finitos era a ferramenta de seleção na análise de curvas segmentadas, e que o seu conceito de curva lisa equivalente deveria ser abandonado. De facto, hoje em dia, o método dos elementos finitos revela um papel dominante no estudo de estruturas e componentes de engenharia, e a maioria das companhias, quando confrontadas com a necessidade de analisar curvas tubulares segmentadas, irão certamente preferir esta abordagem, a cálculos analíticos usando a teoria das cascas.

Estudos realizados a partir dos finais da década de 80, dão início à introdução de efeitos de plasticidade e grandes deslocamentos. A informação sobre o comportamento dos materiais após a cedência já se encontra bem documentada, sendo empregue no estudo de condições limite de rutura, sob pressão e colapso por flexão, de elementos curvos

Kitching et al. [32], realizou um modelo de elementos finitos do tipo casca, para examinar o comportamento após cedência, de duas curvas de alumínio com comprimentos de tubos tangentes desiguais, cujo procedimento experimental tinha sido anteriormente produzido por *So* [17]. A comparação não foi razoável, facto atribuído ao modelo material de *Kitching*, que considerava um material elástico-perfeitamente plástico, quando a curva real mostrava indícios de um encruamento significativo.

Em 1991, *Rahimi* [33] apresentou resultados sobre três curvas segmentadas de aço sob pressão, com três ângulos distintos, de 90°, 120° e 150°, sujeitas a flexão no plano até à rotura. Os seus resultados compararam favoravelmente com modelos de elementos finitos com grandes deslocamentos, assim como com uma solução teórica de limite inferior.

Já em 2002, *Robinson e Babaii Kocheekseraii* [34], produziram um estudo paramétrico sobre o momento limite de curvas segmentadas simples. Os resultados para o limite superior e inferior foram obtidos através de modelos de elementos finitos do tipo casca. O autor, na sua tese de doutoramento [35], realçou a importância da introdução de efeitos de grandes deslocamentos, na análise de curvas com carregamento combinado, de pressão e flexão, ilustrando que o estado de tensão final dependia da sequência de carregamento.

Voltando a atenção para os materiais não-isotrópicos, pode afirmar-se que hoje em dia, toda a capacidade computacional de análise por elementos finitos, apresenta uma abordagem viável no estudo de curvas segmentadas, mesmo com a complexidade imposta pelo material. Contudo,

obter modelos materiais precisos é ainda um grande desafio.

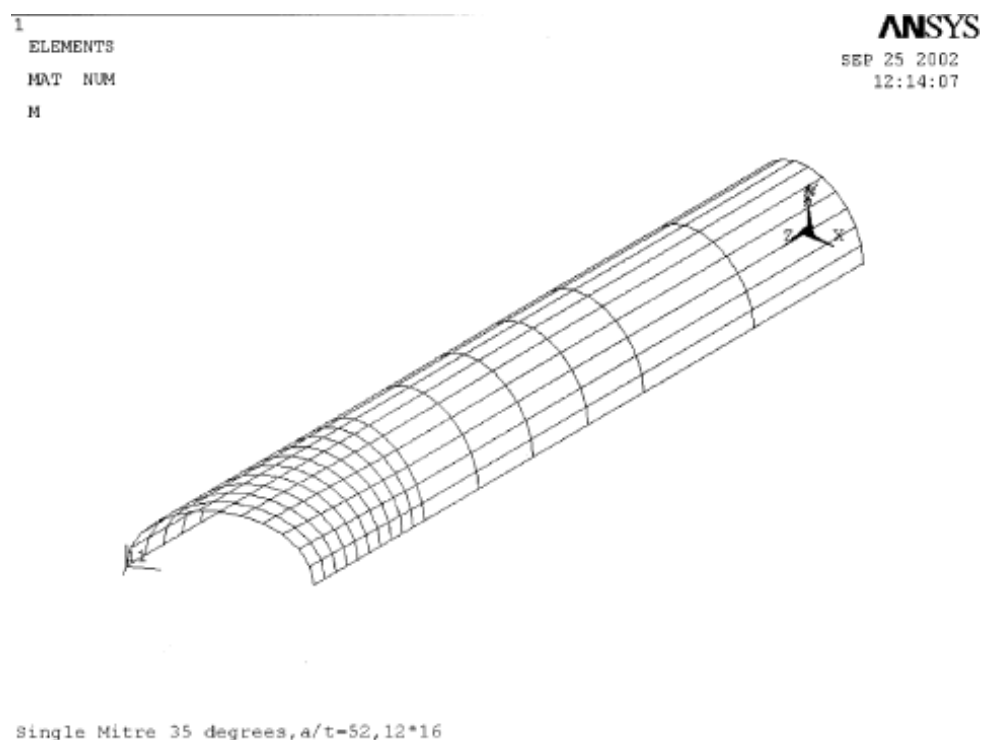


Figura 3.10: Modelo de elementos finitos usado por *Babaii Koçekseraii* [36].

Ingenhousz [24], *Hose* [37], *Kitching e Hose* [26], *Babaii Koçekseraii* [35] e *Babaii Koçekseraii e Robinson* [38], realizaram testes em curvas segmentadas de GRP com revestimento interior em PVC. Nestes estudos, contudo, a camada de GRP foi assumida como sendo quase-isotrópica aquando da definição dos modelos de elementos finitos, que consistiam de duas camadas de elementos de casca do tipo laminado. A figura 3.10 ilustra o modelo de elementos finitos usado por *Babaii Koçekseraii e Robinson*. O processo de construção das curvas levou a um arredondamento geral das interceções dos segmentos, principalmente na zona interior da curva, o que representa disparidade importante em relação aos modelos de elementos finitos. *Hose* [37], refere também que curvas segmentadas simples, não são normalmente atrativas para ângulos de curvatura elevados, uma vez que a moldação das mantas compósitas se torna difícil. Além disso, a necessidade de reduzir a concentração de tensões, na zona da interceção de segmentos, dada a natureza frágil do GRP, implica a natural preferência pelo uso de curvas com vários segmentos.

No estudo referido em cima, *Babaii Koçekseraii e Robinson* [38], concluíram que apenas uma análise por elementos finitos, considerando grandes deslocamentos, era adequado ao estudo de curvas sujeitas a pressão interna e flexão no plano. Os resultados obtidos confirmaram, na sua maioria, os limites obtidos por análise de elementos finitos, exceto para ângulos de curvatura de 90° , em curvas segmentadas simples. Para estas curvas, verificou-se uma repentina e elevada subida do limite, para a qual os autores não encontraram resposta (ver figura 3.11). Os autores referiram também que o mecanismo de interação não-linear poderia ser objeto de estudo de investigações futuras.

R. Neilson et al [39] apresentaram, em 2010, uma comparação de cargas limite de rotura plástica, obtidas experimentalmente através de testes de flexão no plano, de três curvas segmentadas de 90° , com resultados de vários modelos de elementos finitos sólidos 3D. Nos testes foi aplicado um momento fletor a provocar o fecho da curva, tal como ilustrado na figura 3.12, resultando na ovalização da secção transversal da mesma, enfraquecendo a estrutura para além da obvia deformação plástica. Os autores referem que estes mecanismos apenas são observáveis na simulação numérica, se for incluído o efeito de grandes deslocamentos (ver figura 3.13). No caso de ser

adotada uma solução considerando pequenos deslocamentos e um material elástico-perfeitamente plástico, o modelo sobrestimou a carga limite de rotura em mais de 40%. Foi obtida uma boa concordância entre os resultados numéricos e analíticos, como se pode observar na figura 3.14.

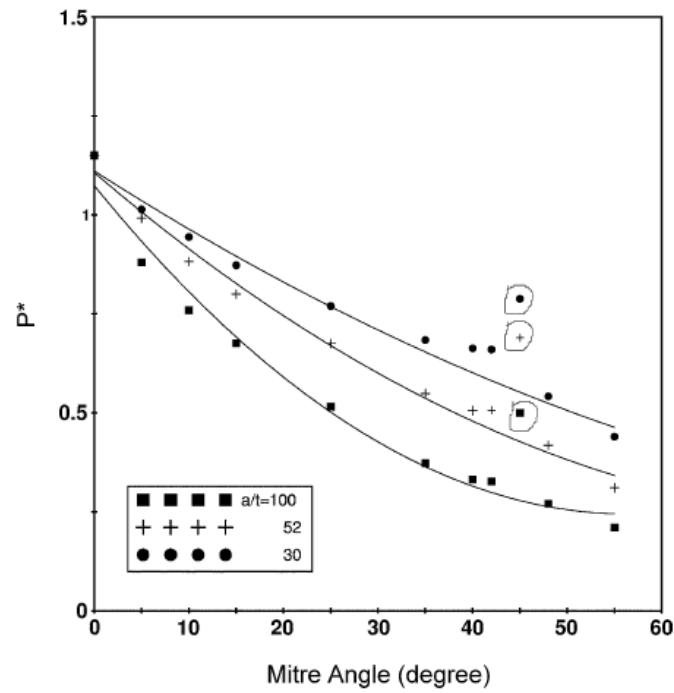


Figura 3.11: Variação da pressão interna limite, com o ângulo de curvatura ($angcurv = 2 \times mitreangle$), obtido nos testes de *Babaii Kocheksarai e Robinson* [38].

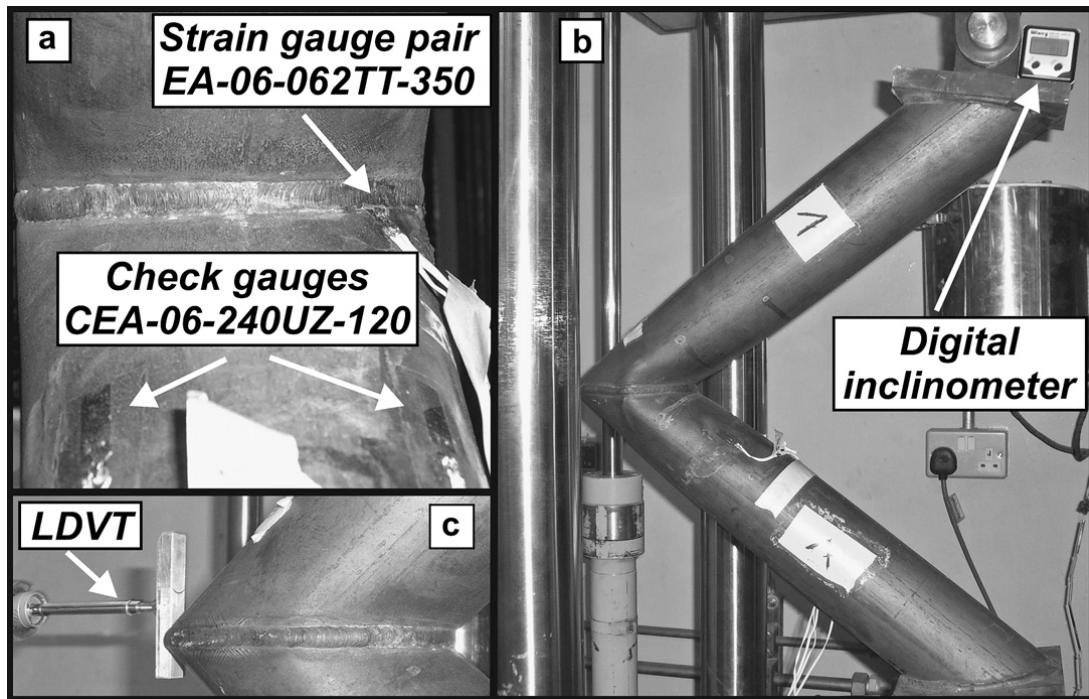


Figura 3.12: Procedimento experimental e instrumentação usada nos testes de *R. Neilson et al* [39].

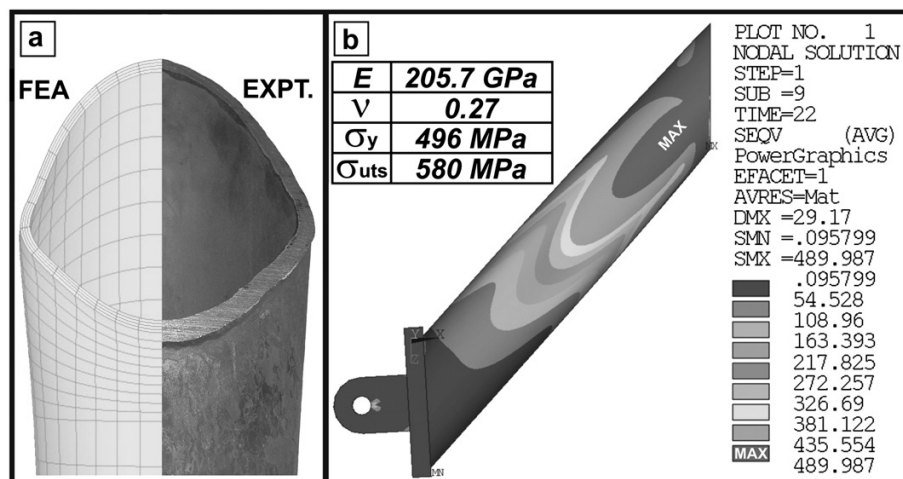
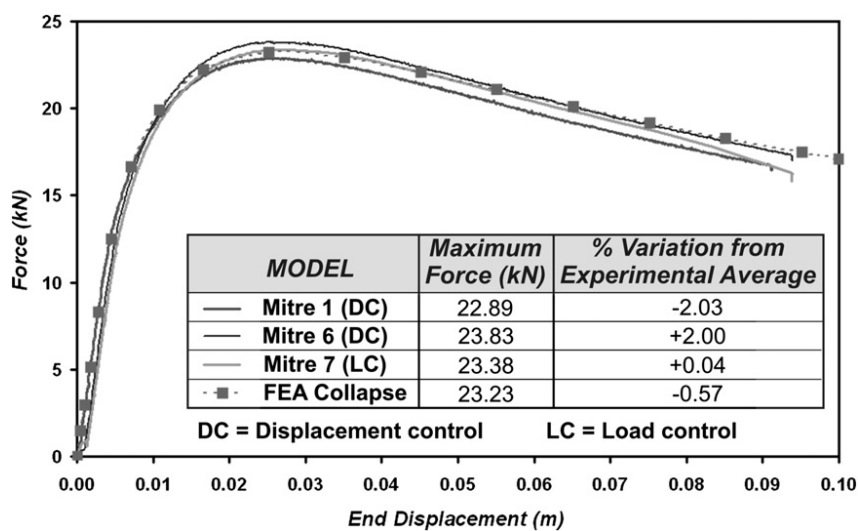
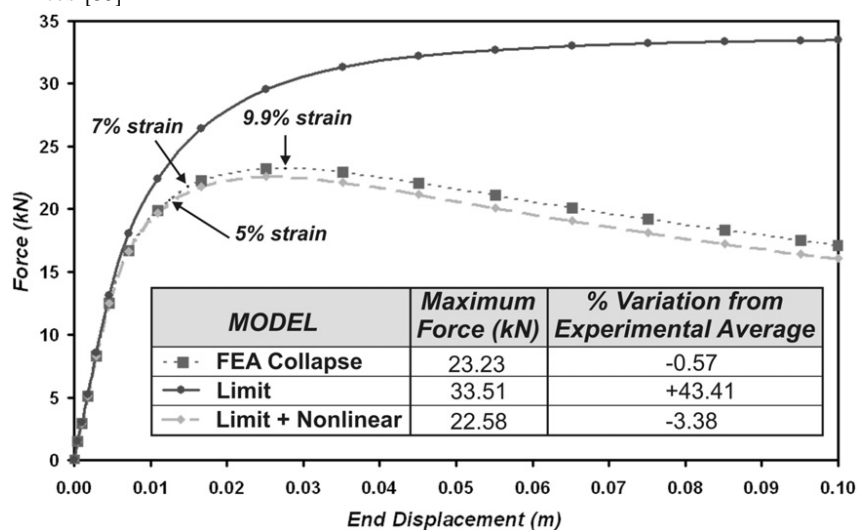


Figura 3.13: Ovalização e campo de tensões obtidos nas simulações numéricas de *R. Neilson et al* [39].



(a) Comparação entre os dados experimentais e a análise numérica por elementos finitos [39] .



(b) Comparação entre a simulação numérica e calculos de carga limite [39].

Figura 3.14: Resultados do estudo de *R. Neilson et al.*

Não só a análise de elementos curvos, pelo método dos elementos finitos, foi alvo da atenção de investigadores. Os próprios elementos, usados nestas análises, e suas formulações foram estudados. *Queirós de Melo et al* [40], desenvolvem neste trabalho, dois elementos tubulares curvos, com dois nós e secção tubular associado a estes. A formulação é baseada na teoria de deslocamento de cascas finas descrito por meio de funções polinomiais ou trigonométricas de ordem elevada, de modo a modelar fenómenos de distorção e ovalização da secção da curva. São apresentados resultados para o fator de flexibilidade de curvas lisas sujeitas a pressão interna e momentos fletores. Os autores afirmam que estes novos elementos finitos são simples e fáceis de usar, evitando o pré-processamento de uma malha de definição de superfícies de casca, proporcionando uma alternativa a análises de curvas lisas mais complexas, usando elementos de casca sólidos ou de viga. Com esta formulação é possível calcular o campo de deslocamentos da curva, para qualquer carregamento no plano da mesma.

As referências mencionadas nesta secção, são as mais relevantes do ponto de vista do emprego de elementos finitos na análise de curvas segmentadas. Contudo, existe uma extensa bibliografia disponível, no que toca ao uso deste método, no contexto dos materiais compósitos e simulação de processos de fabrico de tubagens, por enrolamento filamentar ou outros, assim como acerca do estudo de tubagens no geral.

Jaroslav Mackerle [41], é um reconhecido autor de bibliografias científicas, o qual apresenta uma lista bibliográfica sobre análise de processos de fabrico de componentes compósitos pelo método dos elementos finitos. De igual modo, o autor compila de forma intensiva, referências sobre este tipo de análises em tubagens e reservatórios de pressão, publicadas entre 1998 e 2001 [42], e 2001 e 2004 [43]. Estas referências podem ser de utilidade acrescida para qualquer leitor que esteja interessado em aprofundar a sua pesquisa bibliográfica, no que toca ao uso de elementos finitos na análise de componentes tubulares curvos, segmentados ou não, entre outros.

3.2 Revisão Tecnológica

Desde o início da existência do que se pode chamar de manufatura, ou processo de fabrico, que o objetivo primário é o de procurar formas de aumentar a produção e baixar os custos associados à mesma. No caso de tubagens compósitas, o processo denominado por Enrolamento Filamentar, do inglês *Filament Winding*, é o mais antigo e mais frequentemente considerado, uma vez que se trata de um processo facilmente automatizado, diminuindo os custos de laboração manual e aumentando a reprodutibilidade do processo. Além disso os filamentos contínuos representam a forma mais resistente e barata de reforço de fibra [44].

A seguir são descritos os processos de produção por enrolamento filamentar mais empregues na produção de tubagem compósita.

3.2.1 Enrolamento Filamentar Descontínuo

O processo de enrolamento filamentar descontínuo, ou do inglês *Discontinuous Filament Winding* (DFW), consiste em puxar fibras de vidro, sob tensão controlada, através de um banho de resina catalizada. O banho de resina movimenta-se longitudinalmente ao longo de um mandril rotativo, onde as velocidades combinadas, de avanço do banho e de rotação do mandril, estabelecem o ângulo de enrolamento. O banho viaja para trás e para frente, até se atingir a espessura pretendida. A figura 3.15 representa esquematicamente o processo descrito.

A tensão aplicada nas fibras produz um laminado de elevado teor de fibra, tipicamente 70% do peso do tubo, resultando numa casca estrutural altamente ortotrópica [12]. O tubo é submetido a um processo de pré-cura ainda no mandril e só depois é retirado, as extremidades calibradas e testado hidrostáticamente, de forma a comprovar que o tubo suporta a pressão nominal para que foi projetado, e finalmente é executado um novo processo de cura, ou seja, uma pós-cura. Na figura 3.16 é ilustrado o processo de DFW em funcionamento.

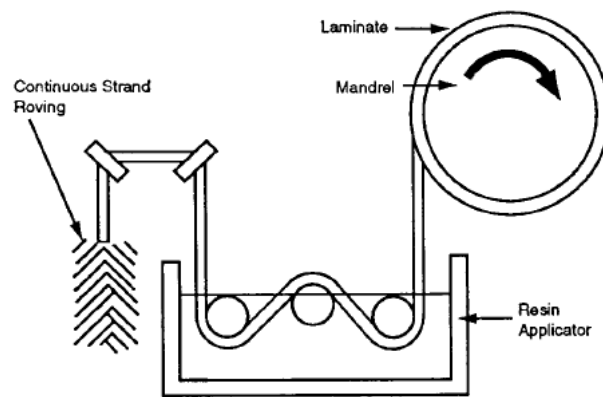


Figura 3.15: Representação esquemática do processo de Enrolamento Filamentar [44].



(a) Plataforma com o banho de resina (à frente) e madril rotativo (atrás) [8].



(b) Bobinas de alimentação [8].

Figura 3.16: Ilustrações do processo de DFW.

Este método de produção de tubagem de GRP é mais caro que o enrolamento filamentar contínuo descrito na secção seguinte e é usado para aplicações especiais onde sejam necessárias características melhoradas de resistência mecânica e térmica, ou seja, para pressões nominais e temperaturas mais elevadas [45].

3.2.2 Enrolamento Filamentar Contínuo

Este processo é em tudo semelhante ao apresentado na secção 3.2.1, como mostra a figura 3.17. A diferença no fabrico por Enrolamento Filamentar Contínuo, do inglês *Continuous Filament Winding* (CFW), está no facto de que neste método, o tubo produzido é contínuo. O mandril rotativo é montado na máquina, conforme o diâmetro pretendido, em seguida é enrolada uma fita metálica entre o mandril e a primeira camada de material compósito, que serve de base e suporte ao enrolamento filamentar que se segue.

O enrolamento pode ser constituído por vários subprodutos de GRP, como mantas de filamentos longos ou curtos, o próprio enrolamento filamentar e até areia de sílica, em simultâneo. A areia de sílica é normalmente depositada em camadas próximas ao plano médio da tubagem, de modo a aumentar a sua rigidez [46].



Figura 3.17: Ilustração do processo de Enrolamento Filamentar Contínuo [46].

O corte do tubo é realizado após a pré-cura, através de uma lâmina de corte rotativa, própria para compósitos, instalada num anel de suporte tal como ilustrado na figura 3.18.



Figura 3.18: Processo de corte usado no método de CFW [46].

Desta forma, é possível obter tubo de comprimento variável conforme a necessidade produtiva e sobretudo elimina-se a necessidade de parar o processo para que se possa retirar o tubo do mandril, eliminando assim por completo um passo intermédio, resultando num processo mais fluído e com menor custo. Esta capacidade é facilmente visível através da figura 3.19.



Figura 3.19: Ilustração da continuidade do processo de CFW [46].

3.2.3 Processo de Moldação Por Centrifugação

O processo de moldação por centrifugação, ou *Centrifugal Casting Process* (CCP), consiste na introdução dos materiais constituintes do tubo, diretamente num tambor rotativo, através de um braço de alimentação. No tambor é previamente inserido o molde que estabelece o diâmetro exterior do tubo.

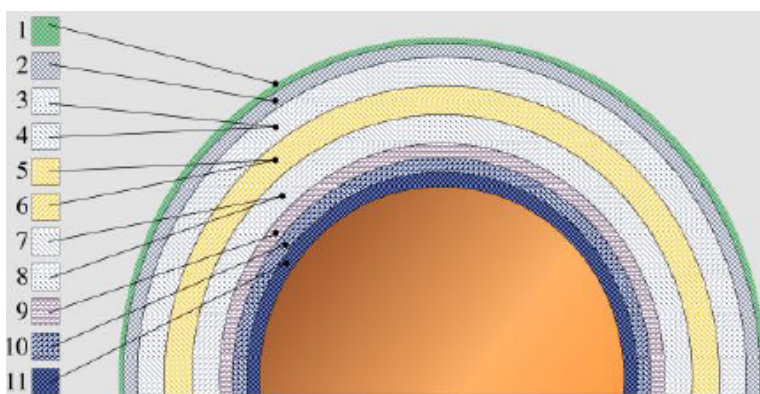
Os materiais a introduzir no tambor são armazenados em bruto, em tanques de armazenamento próprios, sendo misturados e bombeados até ao braço de alimentação conforme a qualidade da camada pretendida. Este processo é controlado automática e eletronicamente de forma se obter a espessura e qualidade necessárias.

A mistura depositada no interior do molde é distribuída de uma forma homogênea pela sua circunferência, devido à compressão desenvolvida pela velocidade de rotação do tambor. Após arrefecer, a tubagem é extraída diretamente do molde, como se pode observar através da figura 3.20.



Figura 3.20: Extração de um tubo do molde de moldação por centrifugação [46].

As propriedades mecânicas são ajustadas, alterando a distribuição e organização dos filamentos, assim como a quantidade e proporções de resina e areia de sílica, de forma a se obter as resistências axial e radial pretendidas. As várias camadas são polimerizadas como um bloco sólido, mas cada uma tem a sua função específica. A figura 3.21 ilustra esquematicamente a composição de um tubo típico, obtido por este processo.



(a) Seção de tubo típica em CCP [8].



(b) Exemplo da seção de um tubo obtido por CCP [47].

Figura 3.21: Ilustrações de secções obtidas por CCP.

Na figura 3.21-a, a camada interior (11) tem uma espessura mínima de resina flexível, sem fibra de vidro, de modo assegurar muito boas propriedades hidráulicas, assim como resistência à abrasão elevada; as camadas 9 e 10 são camadas de revestimento e barreira, combinadas

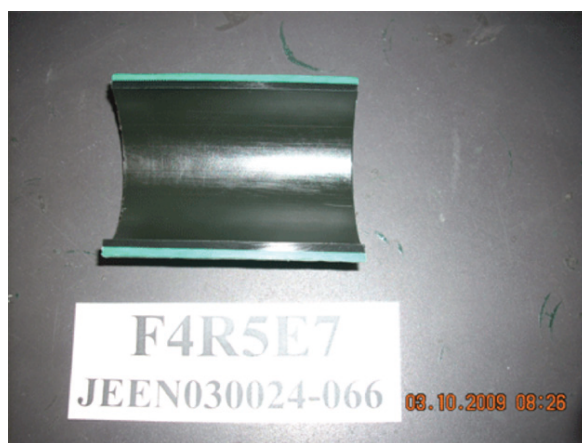
para evitar que algum material penetre as camadas estruturais; as camadas 8 a 3 são camadas estruturais, projetadas de acordo com a classe de pressão e rigidez pretendidas; e as camadas 1 e 2, servem novamente o propósito de proteger o tubo, mas desta feita, não só contra impactos ou outros eventos no decorrer de operações de transporte, mas também contra o efeito dos raios ultravioleta [46].

3.2.4 Tubagens Bobinadas

Introduzida no mercado em 1999 [48], esta nova solução é produzida de forma automatizada, permitindo o fabrico contínuo de tubagem com grandes comprimentos. Este tipo de tubagem combina as vantagens inerentes à utilização de tubagem termoplástica contínua como revestimento interno da tubagem, sobre o qual é aplicado um reforço de fibras de vidro secas, ou bandas de aço enroladas helicoidalmente. Ao exterior é aplicada uma nova camada de material termoplástico, de forma a proteger o reforço contra adversidades afetas ao ambiente exterior. A figura 3.22 mostra um exemplo deste tipo de tubagem bobinada, do inglês *spoolable*, onde se pode observar a sua construção e o reforço de fibras de vidro secas, sobreposto à camada termoplástica interna.



(a) tubagem *spoolable* após teste hidrostático a mais de 400bar [48].



(b) Secção axial de tubagem *spoolable* [48] .

Figura 3.22: Exemplos de tubagem *spoolable*.

A solução apresentada oferece vantagens bastante significativas ao nível da segurança e redução de custos, eliminando o uso de conexões e acessórios e reduzindo dramaticamente o tempo de instalação, visto apenas ser necessária uma pequena equipa para desenrolar a tubagem da bobina diretamente para uma vala previamente aberta para a receber. No entanto, deve-se notar que este método apenas é comportável para tubagens de pequeno diâmetro, pois seria impossível enrolar tubagem de grandes dimensões ao longo de comprimentos apreciáveis.

3.2.5 Fabrico de Acessórios e Curvas Por Moldação Manual

Após rever a tecnologia disponível para o fabrico de tubagem “reta”, passa-se agora a apresentar os métodos de fabrico de acessórios e curvas, mais próximos do âmbito desta dissertação.

No fabrico de acessórios por moldação manual, a resina e fibra de vidro são aplicados através de uma pistola pulverizadora ou à mão, num molde estacionário ou rotativo. A combinação resina/fibra é calcada de modo a remover ar aprisionado, compactar as camadas de compósito e assegurar uma impregnação completa das fibras de vidro. Este procedimento pode ser observado na figura 3.23.



Figura 3.23: Aplicação de reforço por moldação manual, numa curva compósita [12].

O número de camadas consecutivas que se podem aplicar é limitado, devido ao calor libertado no processo de cura da resina, pelo que se deve deixar o acessório curar, aplicando as camadas seguintes depois de arrefecer, evitando a formação de bolhas na peça [12]. Além disso, cada sequência de reforço deve começar e terminar com a aplicação de uma camada de manta de fibras curtas para proporcionar maior adesão.

Esta técnica permite uma aplicação ilimitada de camadas, pelo que estas podem ser inseridas nas direções que se tomarem como as mais importantes do ponto de vista estrutural. Com este processo podem-se obter peças quase-isotrópicas ou altamente ortotrópicas. Esta questão, apesar de parecer uma vantagem, torna-se muitas vezes uma desvantagem, pois requer uma mão de obra bastante qualificada para se produzirem acessórios de elevada qualidade, como a exemplificada na figura 3.24.



Figura 3.24: Exemplo de um acessório obtido por moldação manual [12].

3.2.6 Fabrico de Acessórios e Curvas Por Entrançado de GRP

O processo padrão de fabrico de tubagens retas é o enrolamento filamentar, no entanto, a produção de componentes mais complexos, como curvas, redutores, ou interceções, torna-se mais complicado e custoso. É neste contexto que surge a tecnologia de produção de elementos de GRP entrançado, do inglês *braiding*. Este método é relativamente novo e ainda se encontra a ser desenvolvido trabalho de investigação acerca da eficiência da empregabilidade desta tecnologia na produção de elementos de tubagens [49].

Em contraste com a técnica de enrolamento filamentar, o *braiding* é mais barato para o fa-

brico de acessórios, uma vez que se trata de um processo mais rápido, com um elevado grau de variabilidade de arranjos das fibras de reforço. De facto, um estudo conduzido pela *Boeing* concluiu que os custos associados à produção de componentes de tubagem complexos, pelo método de *braiding*, podem ser reduzidos em cerca de metade, face aos custos com a técnica de enrolamento filamentar [49], primeiramente devido à poupança de tempo de produção, e segundo, devido à simplificação no arranjo do reforço, melhor ajustado à geometria de peças complexas.

O entrançado assistido por computador permite obter um reforço verdadeiramente 3D, devido ao uso de configurações e trajetórias complexas das fibras de reforço, combinado com a introdução de fibras longitudinalmente ao entrançado, como mostra a figura 3.25. Neste processo, a impregnação das fibras com resina é obtida pela técnica de vácuo, embora a consolidação no local, através do uso de um híbrido de fibras quentes e material termoplástico no decurso do entrançado, esteja em investigação [49].

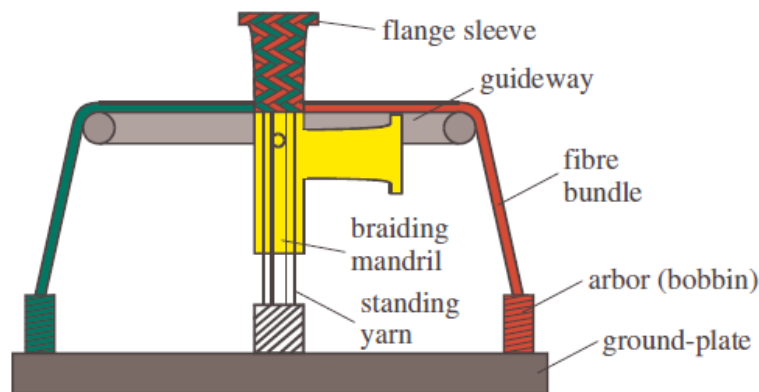


Figura 3.25: Ilustração representativa do processo de entrançado de GRP [49].

Para além de todas estas características, com a introdução de robôs multiaxiais, consegue-se uma particularmente vasta variedade de possibilidades de projeto, pois estes permitem efetuar um movimento espacial mais fluído do mandril, tal como o ilustrado na figura 3.26. No limite, torna-se possível a produção completa de um acessório numa só estação de trabalho, se for utilizado um revestimento termoplástico interior como mandril de *braiding*.

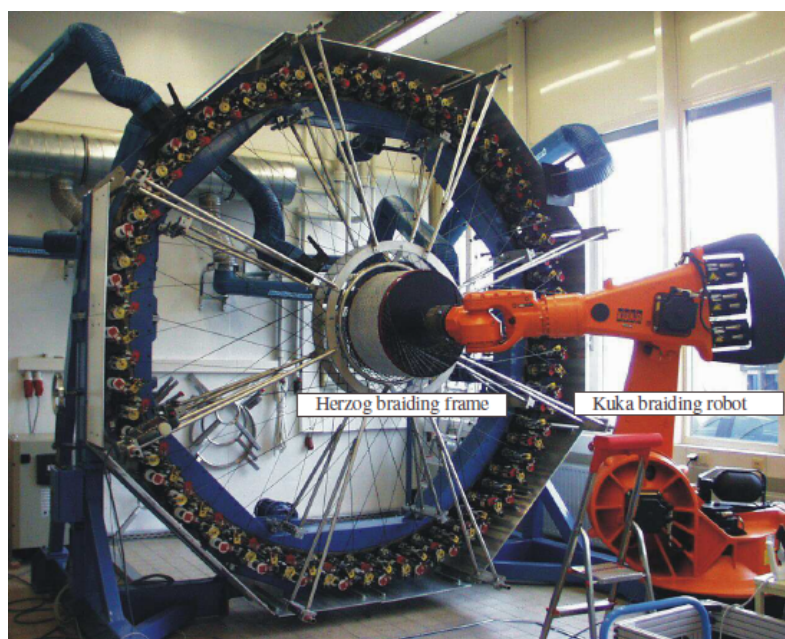


Figura 3.26: Estrutura de *braiding*, da *Herzog*, com apoio de um robô de 6 eixos *Kuka* [49].

3.2.7 Fabrico de acessórios e Curvas Por Enrolamento Filamentar

De todos os processos de produção de tubagens e acessórios, descritos nas secções anteriores, os únicos que permitem executar curvas lisas de GRP são o método de moldação manual e através da técnica de *braiding*. Produzir curvas de grandes diâmetros por moldação manual seria uma tarefa demasiado demorada e custosa, e apesar do enorme potencial do método de *braiding*, o equipamento necessário e a difícil parametrização do processo, aproximam os produtores de tubagem compósita de outros métodos mais simples e baratos.

Um desses processos faz uso de outro método, já muito bem estabelecido, o enrolamento filamentar. Apesar do aparato de construção se assemelhar ao empregue no fabrico de entrancados, este não necessita de um conhecimento e controlo de tantos parâmetros do processo, visto o procedimento ser praticamente o mesmo que para tubo reto. A figura 3.27 mostra alguns exemplos de acessórios a serem fabricados por este método.



(a) Interseção em "T" fabricada por enrolamento filamentar [8] .



(b) Curva lisa construída por enrolamento filamentar [8] .

Figura 3.27: Exemplos do fabrico de acessórios por enrolamento filamentar.

3.2.8 Fabrico de Curvas Segmentadas de GRP

Mais uma vez, indo de encontro ao objeto de estudo desta dissertação, é a seguir apresentada a forma como curvas segmentadas de GRP são construídas e as razões que as tornam tão importantes para os fabricantes de tubagem.

Como se pode observar nas secções 3.2.6 e 3.2.7, o processo a executar para a obtenção de acessórios curvos pode ser bastante moroso, de difícil execução e projeto, implicar investimentos avultados em maquinaria especializada e até mesmo impossível para tubagens de diâmetro muito elevado, como as utilizadas em *pipelines* de transporte de água, petróleo e gás natural (ver figura 3.28). Portanto, é a motivação económica e de simplicidade de processos, que leva engenheiros e projetistas a considerar o uso de curvas segmentadas de GRP.

A sua construção está intimamente ligada ao processo de enrolamento filamentar contínuo, no sentido em que, uma vez que os segmentos constituintes da curva são retos, estes podem ser simplesmente cortados em ângulo, diretamente da linha de produção. Desta forma, elimina-se qualquer investimento em equipamento extra, para além de se poupar no espaço ocupado e peso da zona de produção.

Os segmentos são ligados por meio de colagem adesiva. De entre as várias técnicas de colagem de compósitos, a mais usada em curvas segmentadas é a sobreposição simples, onde o elemento sobreposto pode ser do tipo manta de fibras curtas, para aplicações de baixa pressão, ou outros semi-produtos de fibras contínuas, para aplicações de pressão elevada. Na figura 3.29 pode-se observar este tipo de ligação entre segmentos.



Figura 3.28: Curva segmentada compósita de grandes dimensões [8].



Figura 3.29: Curva segmentada compósita, onde é visível a ligação entre segmentos [8].

4

Metodologia de Cálculo Analítico da Flexibilidade

Numa instalação de tubagens, qualquer secção da mesma pode estar sujeito a pressão interna, momentos de flexão, no e fora do plano, torção, forças axiais ou de corte. O comportamento de secções retas de tubo, sujeitas a este tipo de carregamentos, é relativamente simples e explicável pela teoria de vigas, mas este não é o caso para curvas segmentadas ou lisas.

Uma curva sujeita a flexão no seu plano possui maior flexibilidade do que aquela prevista pela teoria de vigas [50], o que apesar de ser desejável, faz-se acompanhar de um campo de tensões mais elevadas, que as calculadas pela mesma teoria. Numa curva segmentada, acresce ainda o facto de esta ser descontínua, pois a sua geometria implica o aparecimento de zonas de concentração de tensões.

Ainda assim, de acordo com *Gresnigt* [3], o comportamento de curvas segmentadas é cada vez mais similar ao apresentado por curvas lisas, com o aumento do número de segmentos. Ambas são menos rígidas que tubos retos com a mesma espessura, diâmetro e comprimento equivalente. Além disso, ambas sofrem uma ovalização considerável da sua secção transversal, quando sujeitas a um momento fletor, positivo ou negativo, no plano da curva.

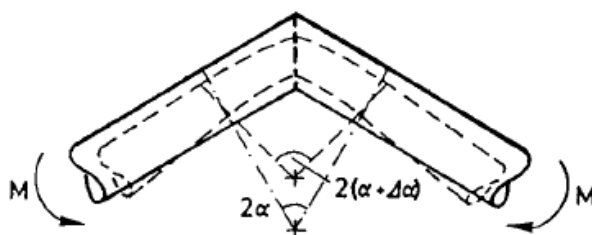


Figura 4.1: Representação da deformada de uma curva segmentada, sujeita a “flexão positiva” [3].

Note-se que um momento que provoque a diminuição do ângulo de curvatura da curva (2α), se denomina de “flexão negativa”, enquanto um momento que provoque um acréscimo do ângulo de curvatura da curva, se denomina por “flexão positiva”.

Apesar das similaridades referidas, a capacidade de deformação plástica de curvas segmentadas varia com o sentido do momento fletor aplicado [3], da forma indicada na figura 4.2. Na referida figura, a linha “a” representa o comportamento de um tubo reto equivalente, e a linha “b” mostra uma solução linear elástica para o caso de flexão no plano de curvas segmentadas. No caso de flexão negativa, a ovalização provoca um aumento da dimensão vertical da secção da curva, ao contrário da flexão negativa, que provoca um aumento da dimensão horizontal da

secção da curva. Isto tem uma implicação clara na secção resistente ao momento aplicado, pelo que uma mesma curva é menos resistente, quando sujeita a flexão positiva.

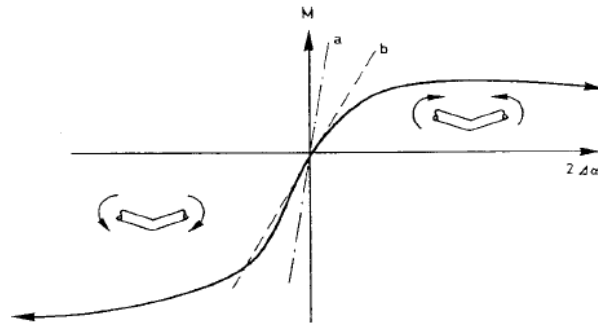
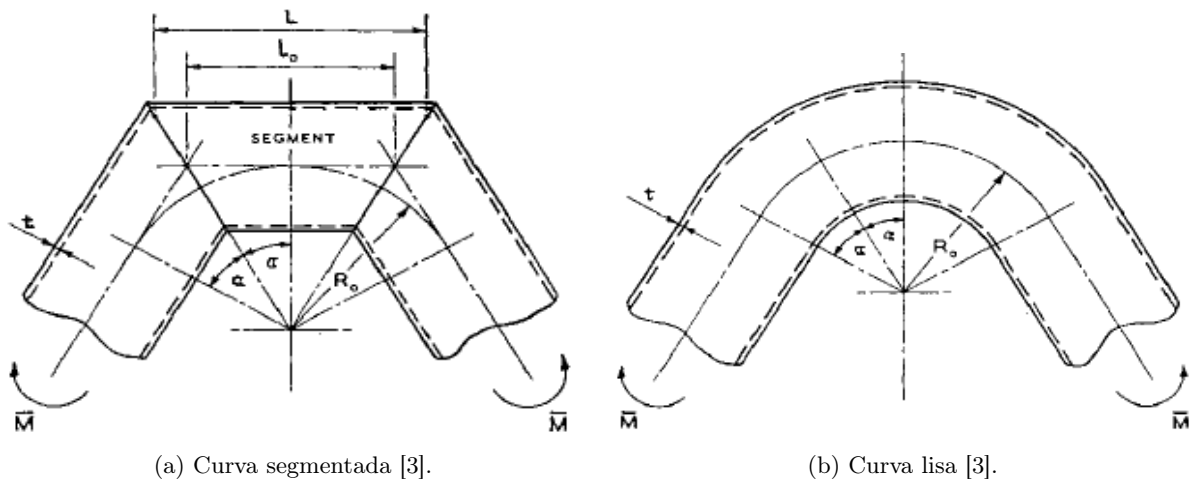


Figura 4.2: Representação da variação do ângulo de curvatura de uma curva segmentada, sujeita a flexão positiva e negativa [3].

Posto isto, a metodologia apresentada a seguir, para o cálculo analítico do fator de flexibilidade de uma curva segmentada, faz uso de modelos analíticos desenvolvidos com base no trabalhos de *von Karman*, sobre curvas lisas, e da analogia observada entre este tipo de curvas e curvas segmentadas, como ilustrado na figura 4.3.



(a) Curva segmentada [3].

(b) Curva lisa [3].

Figura 4.3: Curva segmentada e lisa equivalente.

4.1 Análise de Deformações e Deslocamentos

Antes de mais, é necessário apresentar os pressupostos iniciais decorrentes da aplicação desta metodologia. Primeiro, a curva lisa é tida como sendo de paredes finas, ou seja, $r/t \geq 20$, onde r é o raio médio do tubo e t a sua espessura. Segundo, no cálculo de curvas lisas com ângulo de curvatura $2\alpha_0$ e raio de curvatura R_0 , a rigidez à flexão é assumida como sendo constante ao longo do comprimento da curva.

Além disso, como foi já referido, uma curva tubular sujeita a flexão no plano sofre um achatamento da sua secção transversal, que para efeitos da presente metodologia é considerado constante ao longo de todo o comprimento do tubo. Este pressuposto não é representativo da realidade, pois como foi referido na secção 3.1.1, o acoplamento de outro elemento nas extremidades da curva limita a deformação que esta pode apresentar nas suas extremidades, de modo a que os dois componentes sejam compatíveis, pelo que a ovalização decresce do centro em direção às terminações da curva.

A ovalização da secção é explicada pela teoria do trabalho mínimo, apresentada por *von Karman* [2], que refere que um componente deformado toma a forma que lhe confere a menor energia de deformação. Considere-se um tubo curvo como representado na figura 4.4, sujeito a um momento fletor simétrico nas extremidades (\bar{M}), o qual provoca a rotação dessa extremidade de um ângulo ($d\alpha_0$). Do ponto de vista da teoria de vigas, a fibra representada pela linha superior a cheio teria de se comprimir, e a fibra representada pela linha inferior a cheio teria de se estender, de forma a acomodar a rotação $d\alpha_0$, consumindo uma quantidade de energia de deformação elevada.

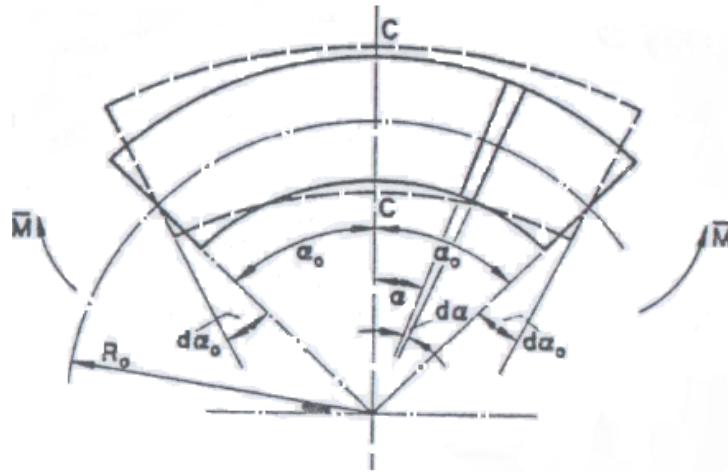


Figura 4.4: Representação de uma curva lisa, sujeita a flexão negativa [51].

No entanto, afastando as mesmas fibras da geratriz da curva, provocando a dilatação do tubo na direção vertical, constitui uma forma destas fibras seguirem a rotação das extremidades da curva, sem serem comprimidas ou estendidas. De forma a manter a energia de deformação o mais baixa possível, o tubo contrai lateralmente concedendo à curva uma secção elítica, como a representada na figura 4.5-a.

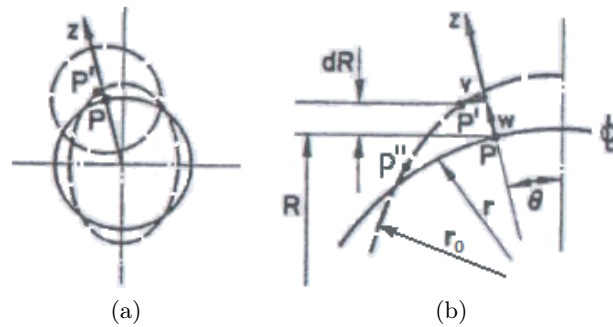


Figura 4.5: Representações dos deslocamentos na curva da figura 4.4 [51]. (a) vista da seção C-C, forma ovalizada da seção da curva; (b) detalhe do perfil deformado da seção transversal da curva.

Observando a figura 4.5-b, tem-se que a seção original da curva é um círculo de raio r , cuja deformação pode ser expressa em função do deslocamento radial w , que por sua vez é função da posição angular θ . O declive do perfil deformado, no ponto P' é dado por:

$$\text{Declive relativo à tangente} = \frac{dw}{r_0 d\theta} \quad (4.1)$$

Onde $d\theta$ é o incremento da posição angular entre o ponto P' e P'' . Considerando que o raio

no ponto P' é $r'_0 = r + w$, desenvolvendo $1/r'_0$ numa série de Taylor, tem-se,

$$\frac{1}{r'_0} = \frac{1}{r + w} = \frac{1}{r \cdot (1 + (w/r))} = \frac{1}{r} \cdot \left(1 - \frac{w}{r} + \dots\right) \quad (4.2)$$

Logo, o declive no ponto P' é,

$$\frac{dw}{r'_0 d\theta} = \frac{dw}{rd\theta} \cdot \left(1 - \frac{w}{r} + \dots\right) = \frac{dw}{rd\theta} - \frac{wdw}{r^2 d\theta} \quad (4.3)$$

Como o deslocamento w é considerado pequeno em relação ao raio r e apenas se retém quantidades da primeira ordem de grandeza, temos que o declive no ponto P' é simplesmente $dw/r d\theta$. No ponto P'' , o declive da tangente à deformada é dado por:

$$\frac{dw}{rd\theta} + \frac{d}{d\theta} \left(\frac{dw}{rd\theta} \right) d\theta = \frac{dw}{rd\theta} + \frac{d^2 w}{rd\theta^2} d\theta \quad (4.4)$$

A diferença entre o declive no ponto P'' e P' é,

$$d\theta - \text{declive em } P'' + \text{declive em } P' = \left(1 - \frac{d^2 w}{rd\theta^2}\right) d\theta \quad (4.5)$$

Assim, a curvatura local do perfil deformado é obtido por:

$$\begin{aligned} \text{Curvatura} &= \frac{\text{diferença de declive}}{\text{comprimento do arco}} = \frac{\left[1 - \left(\frac{d^2 w}{rd\theta^2}\right)\right] d\theta}{r'_0 d\theta} = \frac{1 - \left(\frac{d^2 w}{rd\theta^2}\right)}{r + w} \\ &= \frac{1 - \left(\frac{d^2 w}{rd\theta^2}\right)}{r \cdot (1 + (w/r))} = \frac{1 - \left(\frac{d^2 w}{rd\theta^2}\right)}{r} \cdot \left(1 - \frac{w}{r} + \dots\right) \\ &= \frac{1}{r} - \frac{d^2 w}{r^2 d\theta^2} - \frac{w}{r^2} + \text{termos de ordem mais elevada} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Uma vez que a curvatura inicial é igual a $1/r$, o aumento de curvatura devido à deformação de ovalização é,

$$\text{Incremento na curvatura} = -\frac{1}{r^2} \left(w + \frac{d^2 w}{d\theta^2} \right) \quad (4.7)$$

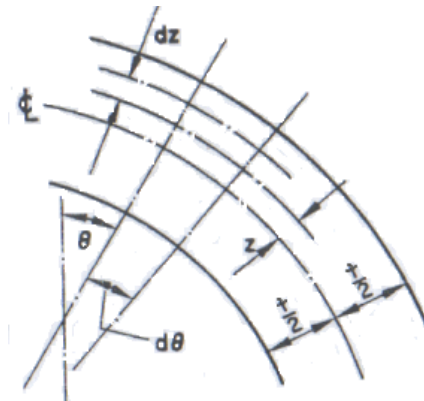


Figura 4.6: Representação da secção do tubo ampliada, detalhe de variáveis sobre a espessura [51].

Observando a figura 4.6, como z é muito mais pequeno que o raio médio do tubo, r , uma vez que se trata de um tubo de paredes finas, a deformação pode ser obtida por z vezes o incremento

na curvatura, definido na equação 4.7. Assim, a deformação radial (ϵ_θ) é expressa pela equação 4.8, onde z varia entre $-t/2$ e $t/2$, ou seja, a espessura da parede do tubo curvo.

$$\epsilon_\theta = -\frac{z}{r^2} \left(w + \frac{d^2 w}{d\theta^2} \right) \quad (4.8)$$

Outro pressuposto inerente à aplicação desta teoria é que qualquer elemento linear da secção originalmente circular do tubo, retém o seu comprimento, $r d\theta$, quando a sua secção se torna elítica. Este pressuposto denomina-se de *Propriedade de Inextensibilidade de Rayleigh* e implica que a mudança de forma da secção do tubo, não se dá apenas por deslocamento radial, mas requer que exista um deslocamento tangencial v como se pode observar através da figura 4.5.

A dedução desta condição de inextensibilidade não é apresentada, mas importa referir a sua aplicação neste caso, possibilitando assim definir os deslocamentos radial e tangencial, da seguinte forma [50]:

$$w = -\frac{dv}{d\theta} \Leftrightarrow v = -\int w d\theta \quad (4.9)$$

Analisando a figura 4.5-b, desta vez para auxílio no cálculo da deformação longitudinal, onde R é o raio de um ponto na secção original, em relação ao centro de curvatura da curva, e dR é o incremento deste raio, devido à deformação de ovalização.

A deformação longitudinal, devido ao achatamento da secção transversal, é assim definida por:

$$\epsilon_{xOval} = \frac{dR}{R} = \frac{w \cos \theta - v \sin \theta}{R} \quad (4.10)$$

Para além da deformação devida à ovalização, tem de se contabilizar a deformação axial proveniente da flexão da curva, ou seja, devido à rotação das extremidades de um ângulo combinado de $2d\alpha_0$. O alongamento axial de uma fibra, no ponto P' da figura 4.5-b, devido a este efeito é $2d\alpha_0 r \cos \theta$, logo temos,

$$\epsilon_{xFlex} = \frac{\Delta l}{l} = -\frac{2rd\alpha_0 \cos \theta}{2R\alpha_0} \quad (4.11)$$

Segundo *Den Hartog* [50], para tubos onde $R_0 > 5r$, pode-se substituir R por R_0 , na equação 4.11, sem incorrer num erro substancial.

Assim, a deformação axial total é dada pela expressão seguinte.

$$\epsilon_x = \epsilon_{xOval} + \epsilon_{xFlex} = \frac{w \cos \theta - v \sin \theta}{R_0} - \frac{2rd\alpha_0 \cos \theta}{2R_0\alpha_0} \quad (4.12)$$

As equações 4.8 e 4.12 determinam as deformações principais em qualquer elemento da curva lisa. Note-se que na direção da espessura as tensões são nulas, visto tratar-se de uma casca fina. Neste momento, é possível calcular a flexibilidade da curva lisa através do teorema de energia mínima. A energia de deformação (U) é expressa em termos das constantes elásticas do material, da geometria da curva e do deslocamento radial w , representado numa série de *Fourier*, do tipo,

$$w = \sum_{n=2}^n w_n \cos n\theta \quad (4.13)$$

A energia de deformação é dada pela seguinte expressão:

$$U = \int \frac{E}{2(1-\nu^2)} \cdot (\epsilon_\theta^2 + \epsilon_x^2 + 2\nu\epsilon_\theta\epsilon_x) d(Vol) \quad (4.14)$$

A expressão anterior pode ser simplificada, pois, observando as deformações que se formam em duas fatias de espessura dy a igual distância do plano médio da curva, como representado

na figura 4.7, se verifica que a deformação axial (ϵ_2) é constante, e a deformação tangencial (ϵ_1) é igual e de sinais opostos em cada fatia, pelo que o seu produto tem também sinais opostos. Desta forma, o terceiro termo da equação 4.14, anula-se quando integrado no volume do tubo.

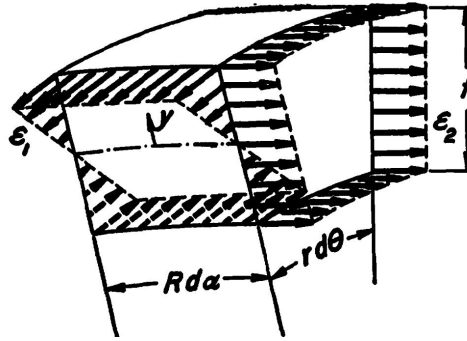


Figura 4.7: Deformações num elemento da parede da curva [50].

Assim, o cálculo de U é composto pela soma do integral, no volume, das duas primeiras parcelas da equação 4.14, apresentadas da seguinte forma:

$$U_\theta = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \int_0^{2\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \epsilon_\theta^2 R_0 d\alpha r d\theta dz \quad (4.15)$$

$$U_x = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \int_0^{2\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \epsilon_x^2 R_0 d\alpha r d\theta dz \quad (4.16)$$

Ao proceder à integração de $U = U_x + U_\theta$ no volume da curva, chega-se a um sistema de equações com a energia de deformação em ordem a cada um dos coeficientes do deslocamento ($w_2, w_3 \dots w_n$) e ao ângulo $2d\alpha_0$, as quais são minimizadas de forma a se obterem os coeficientes que garantem a energia de deformação mínima, de acordo com a expressão seguinte.

$$\frac{\partial U}{\partial w} = 0 \quad (4.17)$$

Assim, a energia de deformação pode ser avaliada para uma dada rotação $2d\alpha$. Usando o princípio dos trabalhos virtuais, o momento correspondente a essa rotação (\bar{M}), é determinado em função dos parâmetros geométricos da curva e das suas constantes elásticas.

O fator de flexibilidade é então definido como a razão entre o momento necessário à obtenção da rotação $2d\alpha$ na curva tubular com ovalização e na mesma curva, mas sem considerar o efeito de ovalização.

Uma vez que a definição das constantes do material são radicalmente diferentes para materiais metálicos e compósitos, a avaliação do fator de flexibilidade através esta metodologia é realizada separadamente, nas secções 4.2 e 4.3 respetivamente.

4.2 Determinação da Flexibilidade da Curva Metálica

No caso de uma curva lisa metálica, não existem especificidades sobre as propriedades do material a introduzir na metodologia descrita, dada a natureza isotrópica do mesmo, pelo que as únicas constantes inerentes ao material são o módulo de *Young* e o coeficiente de *Poisson*.

Para o deslocamento radial, w , são considerados os três primeiros termos da série de *Fourier*, indicada na equação 4.13, de forma a se obter uma precisão apreciável no cálculo da energia de

deformação e consequentemente do fator de flexibilidade. De facto, quanto maior for o número de termos associados a w , melhor é a aproximação de K . No entanto, no decorrer dos trabalhos afetos a esta dissertação, chegou-se à conclusão que a inclusão de mais de três termos não melhora significativamente a solução obtida, para além de tornar os cálculos computacionalmente mais pesados. Assim, o deslocamento radial é representado da forma:

$$w = \sum_{n=2}^4 w_n \cos n\theta = w_2 \cos 2\theta + w_3 \cos 3\theta + w_4 \cos 4\theta \quad (4.18)$$

Da equação 4.9, para o deslocamento tangencial, temos,

$$v = -w_2 \frac{\sin 2\theta}{2} - w_3 \frac{\sin 3\theta}{3} - w_4 \frac{\sin 4\theta}{4} \quad (4.19)$$

Substituindo as equações 4.18 e 4.19 em 4.8 e 4.12, tem-se as deformações radial e axial apresentadas em baixo.

$$\epsilon_\theta = \frac{3w_2 z \cos(2\theta)}{r^2} + \frac{8w_3 z \cos(3\theta)}{r^2} + \frac{15w_4 z \cos(4\theta)}{r^2} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_x = & \frac{-d\alpha_0 r \cos \theta}{R_0 \alpha_0} + \frac{w_2 \left(\cos(2\theta) \cos \theta + \frac{\sin(2\theta) \sin \theta}{2} \right)}{R_0} \\ & + \frac{w_3 \left(\cos(3\theta) \cos \theta + \frac{\sin(3\theta) \sin \theta}{3} \right)}{R_0} + \frac{w_4 \left(\cos(4\theta) \cos \theta + \frac{\sin(4\theta) \sin \theta}{4} \right)}{R_0} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Substituindo as deformações radial e axial, nas expressões 4.15 e 4.16, respetivamente, e resolvendo a integração, obtém-se as parcelas da energia de deformação a seguir referidas.

$$U_\theta = -\frac{3\pi E R_0 \alpha_0 t^3 w_2^2}{2r^3(2\nu^2 - 2)} - \frac{32\pi E R_0 \alpha_0 t^3 w_3^2}{3r^3(2\nu^2 - 2)} - \frac{75\pi E R_0 \alpha_0 t^3 w_4^2}{2r^3(2\nu^2 - 2)} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} U_x = & -\frac{2\pi E d \alpha_0^2 r^3 t}{R_0 \alpha_0 (2\nu^2 - 2)} + \frac{3\pi E d \alpha_0 r^2 t w_2}{R_0 (2\nu^2 - 2)} - \frac{5\pi E \alpha_0 r t w_2^2}{4R_0 (2\nu^2 - 2)} \\ & - \frac{10\pi E \alpha_0 r t w_2 w_4}{16R_0 (2\nu^2 - 2)} - \frac{10\pi E \alpha_0 r t w_3^2}{9R_0 (2\nu^2 - 2)} - \frac{17\pi E \alpha_0 r t w_4^2}{16R_0 (2\nu^2 - 2)} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$U = U_\theta + U_x \quad (4.24)$$

Assim, a energia de deformação total, U , é obtida simplesmente somando as duas contribuições mencionadas. De forma a calcular a energia de deformação total mínima é necessário resolver a equação 4.17, mas uma vez que w é composto por três termos, tem que se resolver o sistema de equações seguinte.

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial w_2} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial w_3} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial w_4} = 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Avaliando as derivadas parciais e reescrevendo em termos do deslocamento radial, tem-se,

$$\begin{cases} w_2 = \frac{24d\alpha_0 r^5 - 5\alpha_0 w_4 r^4}{24\alpha_0 R_0^2 t^2 + 20\alpha_0 r^4} \\ w_3 = 0 \\ w_4 = -\frac{5r^4 w_2}{600R_0^2 t^2 + 17r^4} \end{cases} \quad (4.26)$$

Resolvendo o sistema de equações, obtém-se o deslocamento radial que garante a energia de deformação mínima na curva.

$$\begin{cases} w_2 = \frac{8d\alpha_0 r^5 \cdot (600R_0^2 t^2 + 17r^4)}{\alpha_0 \cdot (4800R_0^4 t^4 + 4136R_0^2 r^4 t^2 + 105r^8)} \\ w_3 = 0 \\ w_4 = -\frac{40d\alpha_0 r^9}{\alpha_0 \cdot (4800R_0^4 t^4 + 4136R_0^2 r^4 t^2 + 105r^8)} \end{cases} \quad (4.27)$$

Substituindo o resultado anterior na equação 4.24, tem-se a energia de deformação mínima, U_{min} .

$$U_{min} = \frac{E\pi d\alpha_0^2 r^3 t \cdot (4800R_0^4 t^4 + 536R_0^2 r^4 t^2 + 3r^8)}{R_0\alpha_0 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (4800R_0^4 t^4 + 4136R_0^2 r^4 t^2 + 105r^8)} \quad (4.28)$$

Como se pode observar, a energia de deformação está definida apenas em termos do deslocamento angular, $d\alpha_0$, dado que os restantes parâmetros são constantes geométricas. Assim, aplica-se o teorema do trabalho virtual, de forma a alcançar uma relação carga-deslocamento.

Pelo teorema do trabalho virtual, tem-se o momento responsável pelo deslocamento angular da extremidade da curva segmentada, $d\alpha_0$, dado por,

$$\bar{M} = \frac{\partial U_{min}}{2\partial(d\alpha_0)} = \frac{E\pi d\alpha_0 r^3 t \cdot (4800R_0^4 t^4 + 536R_0^2 r^4 t^2 + 3r^8)}{R_0\alpha_0 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (4800R_0^4 t^4 + 4136R_0^2 r^4 t^2 + 105r^8)} \quad (4.29)$$

Ao tomar $w = 0$, ou seja, negligenciando o efeito da ovalização, e reavaliando a expressão 4.24 e 4.29, obtém-se o momento necessário para provocar o mesmo deslocamento angular, $d\alpha_0$, sem o achatamento da secção transversal da curva.

$$\bar{M}_{sem\ Oval} = \frac{E\pi d\alpha_0 r^3 t}{R_0\alpha_0 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4.30)$$

Finalmente, como referido na secção 4.1, o fator de flexibilidade para curvas tubulares lisas e material isotrópico é dado por:

$$K = \frac{\bar{M}_{sem\ Oval}}{\bar{M}} = \frac{4800R_0^4 t^4 + 4136R_0^2 r^4 t^2 + 105r^8}{4800R_0^4 t^4 + 536R_0^2 r^4 t^2 + 3r^8} \quad (4.31)$$

Introduzindo um parâmetro adimensional caraterizador da geometria do tubo, denominado de *pipe factor*, λ , definido por:

$$\lambda = \frac{tR_0}{r^2} \quad (4.32)$$

Rearranjando a expressão 4.31, tem-se,

$$K = \frac{4800\lambda^4 + 4136\lambda^2 + 105}{4800\lambda^4 + 536\lambda^2 + 3} \quad (4.33)$$

4.3 Determinação da Flexibilidade da Curva Compósita

Ao contrário de curvas metálicas, curvas de material compósito impõem uma dificuldade acrescida no cálculo do fator de flexibilidade, pois o material que constitui a curva é de natureza ortotrópica.

Tendo em conta que a energia de deformação é calculada com base nas deformações radial e axial, faz-se a distinção entre o módulo de *Young* nessas mesmas direções de forma a incluir a especificidade introduzida pelo material.

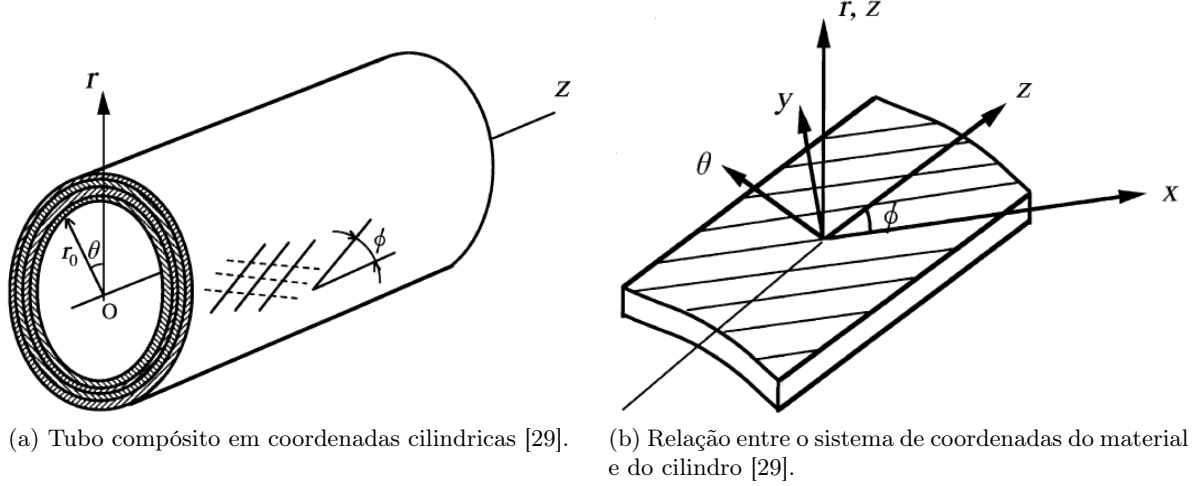


Figura 4.8: Representação esquemática de um tubo compósito.

De acordo com *Xia* [29], a variação das constantes de engenharia (E , G e ν) pode ser expressa em função do ângulo (ϕ) em que é processado o enrolamento filamentar do tubo compósito. A figura 4.8-b ilustra uma lâmina de material compósito, onde o referencial (z, θ, r) está orientado com o cilindro, ou seja, com as direções axial e tangencial das deformações que se pretendem definir. Segundo *Morais* [52], E_z , E_θ , $\nu_{z\theta}$ e $G_{z\theta}$ são assim definidos.

$$E_z(\phi) = \left[\frac{c^4}{E_x} + \frac{s^4}{E_y} + (cs)^2 \cdot \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \right]^{-1} \quad (4.34)$$

$$E_\theta(\phi) = \left[\frac{s^4}{E_x} + \frac{c^4}{E_y} + (cs)^2 \cdot \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \right]^{-1} \quad (4.35)$$

$$G_{z\theta}(\phi) = \left[4(cs)^2 \cdot \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) + \frac{(c^2 - s^2)^2}{G_{xy}} \right]^{-1} \quad (4.36)$$

$$\nu_{z\theta}(\phi) = \frac{(c^4 + s^4) \frac{\nu_{xy}}{E_x} - (cs)^2 \cdot \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{1}{G_{xy}} \right)}{\frac{c^4}{E_x} + \frac{s^4}{E_y} + (cs)^2 \cdot \left(\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right)} \quad (4.37)$$

Nas expressões acima, $c = \cos \phi$, $s = \sin \phi$ e ϕ é o ângulo de enrolamento das fibras.

A forma de se obter o fator de flexibilidade é em tudo idêntica à descrita na secção 4.2, com a diferença que nesta secção a apresentação é feita na forma matricial. Assim, os deslocamentos radial e tangencial são definidos, respetivamente, por:

$$\{w\} = \begin{Bmatrix} w_2 \cos 2\theta \\ w_3 \cos 3\theta \\ w_4 \cos 4\theta \end{Bmatrix} \quad , \quad \{v\} = \begin{Bmatrix} -\frac{w_2 \sin 2\theta}{2} \\ -\frac{w_3 \sin 3\theta}{3} \\ -\frac{w_4 \sin 4\theta}{4} \end{Bmatrix} \quad (4.38)$$

Onde θ é o ângulo definido de acordo com a figura 4.8-a. Substituindo os deslocamentos nas equações 4.20 e 4.21, para as deformações radial e axial, na forma matricial e de acordo com a notação da figura 4.8-b, tem-se,

$$\{\epsilon_\theta\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{3w_2 z \cos(2\theta)}{r^2} \\ \frac{8w_3 z \cos(3\theta)}{r^2} \\ \frac{15w_4 z \cos(4\theta)}{r^2} \end{Bmatrix} \quad \text{e} \quad \{\epsilon_z\} = \begin{Bmatrix} \frac{-d\alpha_0 r \cos \theta}{R_0 \alpha_0} \\ \frac{w_2 \left(\cos(2\theta) \cos \theta + \frac{\sin(2\theta) \sin \theta}{2} \right)}{R_0} \\ \frac{w_3 \left(\cos(3\theta) \cos \theta + \frac{\sin(3\theta) \sin \theta}{3} \right)}{R_0} \\ \frac{w_4 \left(\cos(4\theta) \cos \theta + \frac{\sin(4\theta) \sin \theta}{4} \right)}{R_0} \end{Bmatrix} \quad (4.39)$$

As energias de deformação radial e axial, são obtidas pela integração das expressões seguintes:

$$[U_\theta] = \frac{E_\theta}{2(1-\nu^2)} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \int_0^{2\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \{\epsilon_\theta\}^\top \cdot \{\epsilon_\theta\} R_0 d\alpha r d\theta dz \quad (4.40)$$

$$[U_z] = \frac{E_z}{2(1-\nu^2)} \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \int_0^{2\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \{\epsilon_z\}^\top \cdot \{\epsilon_z\} R_0 d\alpha r d\theta dz \quad (4.41)$$

Desta forma, a energia de deformação total (U) é obtida por:

$$\begin{aligned} U &= \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 ([U_\theta] + [U_z])_{ij} \\ &= \frac{3\pi E_z d \alpha_0 r^2 t w_2}{R_0 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} - \frac{32\pi E_\theta R_0 \alpha_0 t^3 w_3^2}{3r^3 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} - \frac{75\pi E_\theta R_0 \alpha_0 t^3 w_4^2}{2r^3 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} \\ &\quad - \frac{2\pi E_z d \alpha_0^2 r^3 t}{R_0 \alpha_0 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} - \frac{5\pi E_z \alpha_0 r t w_2^2}{4R_0 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} - \frac{10\pi E_z \alpha_0 r t w_3^2}{9R_0 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} \\ &\quad - \frac{17\pi E_z \alpha_0 r t w_4^2}{16R_0 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} - \frac{3\pi E_\theta R_0 \alpha_0 t^3 w_2^2}{2r^3 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} - \frac{5\pi E_z \alpha_0 r t w_2 w_4}{8R_0 \cdot (2\nu_{z\theta}^2 - 2)} \end{aligned} \quad (4.42)$$

De forma a se obter a energia mínima, avaliam-se as derivadas parciais indicadas em 4.25, de onde se obtém:

$$\begin{cases} w_2 = \frac{24E_z d\alpha_0 r^5 - 5E_z \alpha_0 w_4 r^4}{24E_\theta \alpha_0 R_0^2 t^2 + 20E_z \alpha_0 r^4} \\ w_3 = 0 \\ w_4 = -\frac{5E_z r^4 w_2}{600E_\theta R_0^2 t^2 + 17E_z r^4} \end{cases} \quad (4.43)$$

Resolvendo o sistema anterior, obtém-se:

$$\begin{cases} w_2 = \frac{8E_z d\alpha_0 r^5 \cdot (600E_\theta R_0^2 t^2 + 17E_z r^4)}{\alpha_0 \cdot (4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 4136E_\theta R_0^2 r^4 t^2 + 105E_z^2 r^8)} \\ w_3 = 0 \\ w_4 = -\frac{40E_z^2 d\alpha_0 r^9}{\alpha_0 \cdot (4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 4136E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 105E_z^2 r^8)} \end{cases} \quad (4.44)$$

Substituindo os módulos de ovalização obtidos em 4.44 na equação 4.42, tem-se a energia de deformação mínima para curvas de material compósito, descrito em baixo.

$$U_{min} = \frac{E_z \pi d\alpha_0^2 r^3 t \cdot (4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 536E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 3E_z^2 r^8)}{R_0 \alpha_0 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 4136E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 105E_z^2 r^8)} \quad (4.45)$$

Pelo teorema do trabalho virtual, tem-se,

$$\overline{M} = \frac{\partial U_{min}}{\partial d\alpha_0} = \frac{E_z \pi d\alpha_0 r^3 t \cdot (4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 536E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 3E_z^2 r^8)}{R_0 \alpha_0 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 4136E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 105E_z^2 r^8)} \quad (4.46)$$

De forma análoga ao que foi realizado na secção 4.2, negligenciando o efeito da ovalização e reavaliando a expressão 4.42 e 4.46, obtém-se o momento necessário para provocar o mesmo deslocamento angular, $d\alpha_0$, sem o achatamento da secção transversal da curva compósita.

$$\overline{M}_{sem\ Oval} = \frac{E_z \pi d\alpha_0 r^3 t}{R_0 \alpha_0 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4.47)$$

Assim, o fator de flexibilidade para curvas tubulares lisas de material compósito é dado por:

$$K = \frac{\overline{M}_{sem\ Oval}}{\overline{M}} = \frac{4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 4136E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 105E_z^2 r^8}{4800E_\theta^2 R_0^4 t^4 + 536E_\theta E_z R_0^2 r^4 t^2 + 3E_z^2 r^8} \quad (4.48)$$

Introduzindo o parâmetro adimensional λ , e rearranjando a expressão 4.48, fica,

$$K = \frac{4800E_\theta^2 \lambda^4 + 4136E_\theta E_z \lambda^2 + 105E_z^2}{4800E_\theta^2 \lambda^4 + 536E_\theta E_z \lambda^2 + 3E_z^2} \quad (4.49)$$

5

Normas e outras Metodologias Sobre o Cálculo do Fator de Flexibilidade

Como se pode constatar pela evolução do estado da arte apresentada no capítulo 3, vários foram os autores que se dedicaram ao estudo do comportamento mecânico de curvas segmentadas, principalmente durante as décadas de 60 e 70. Como consequência dos seus estudos teóricos e vastas análises experimentais, o conhecimento adquirido sobre este tipo de elementos passou a figurar em códigos relativos a elementos de tubagens e reservatórios de pressão.

São apresentadas a seguir, por ordem cronológica, duas normas e uma metodologia propostas acerca do cálculo do fator de flexibilidade de curvas segmentadas.

5.1 ANSI/ASME B31.8 (1979)

O código *ANSI/ASME B31.8*, direcionado para as linhas de transmissão de gás e sistemas de tubagens de distribuição, tal como exposto em 1979, faz uma distinção peculiar entre o que se podem considerar curvas segmentadas de “espaçamento curto” e “espaçamento longo”, da forma indicada na figura 5.1.

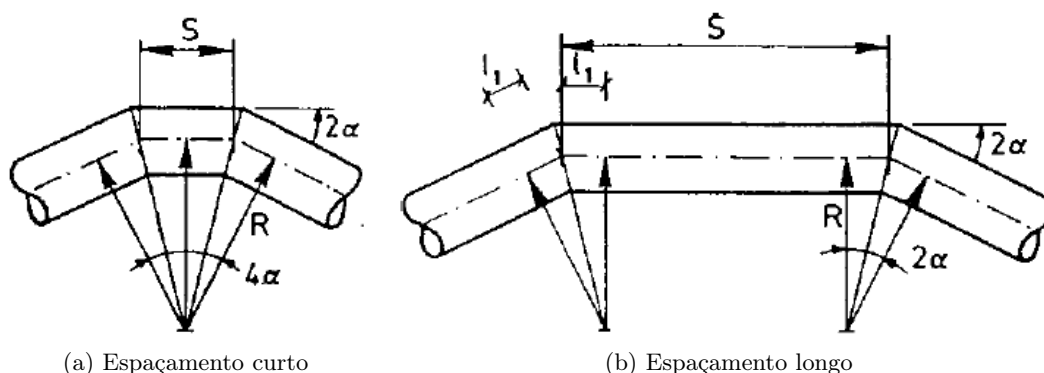


Figura 5.1: Diferenciação entre curvas segmentadas de espaçamento curto e longo [3].

A diferença entre os dois casos prende-se com o facto de se considerar que o campo de tensões atinge o seu máximo junto das interseções entre segmentos, sendo que o seu efeito decai com a distância às mesmas. Assim, nas curvas segmentadas com espaçamento curto, existe uma interação entre os elementos constituintes, considerando-se o conjunto como uma só curva. Já

nas curvas com espaçamento longo, assume-se que não existe interação, pelo que cada interseção é tomada como uma curva individual.

A distância S , tal como identificada na figura anterior, é a distância entre duas interseções consecutivas e dita o tipo de espaçamento da curva. Para curvas de espaçamento curto tem-se:

$$S < r(1 + \tan \alpha) \quad (5.1)$$

Onde r é o raio médio do tubo e 2α é o ângulo de curvatura de uma dada interseção. Note-se que R é o raio de curvatura do conjunto e este varia consoante a tipologia da curva. Para curvas de espaçamento curto R é dado por:

$$R = \frac{S}{2} \cot \alpha \quad (5.2)$$

Por seu turno, para curvas de espaçamento longo temos:

$$S \geq r(1 + \tan \alpha) \quad (5.3)$$

$$R = \frac{r}{2}(1 + \cot \alpha) \quad (5.4)$$

O fator de flexibilidade (K), segundo esta norma é dado para os casos de curvas segmentadas com e sem pressão interna. Para os casos onde não se considera a ação de pressão interna no sistema, tem-se:

$$K = \frac{1.52}{\lambda^{5/6}} \quad (5.5)$$

Onde λ determina um parâmetro geométrico adimensional dado por:

$$\lambda = \frac{tR}{r^2} \quad (5.6)$$

Note-se que t é a espessura do tubo. No caso da análise de um sistema influenciado pela pressão interna, a resistência à ovalização aumenta, pelo que a rigidez à flexão também aumenta. Neste caso, o fator de flexibilidade é obtido por:

$$K_p = \frac{K}{1 + 6 \frac{P}{E} \left(\frac{r}{t}\right)^{7/3} \left(\frac{R}{r}\right)^{1/3}} \quad (5.7)$$

Na expressão anterior, P é a pressão interna e E o módulo de elasticidade.

Note-se esta metodologia mantém-se inalterada, mesmo nas versões mais recentes e atualizadas da norma *ANSI/ASME B31*.

5.2 Gresnigt (1986)

Ao longo dos vários anos de pesquisas e provas experimentais no âmbito do comportamento mecânico de curvas segmentadas, torna-se largamente aparente a similaridade deste comportamento em relação ao exibido por curvas “lisas”.

Em 1986, *Gresnigt* define um modelo de aproximação do fator de flexibilidade baseado em modelos de curvas lisas. De acordo com o ilustrado na figura 5.2, o fator de flexibilidade é obtido através da seguinte expressão:

$$K = \frac{1.65}{\lambda} \quad (5.8)$$

Onde λ é o mesmo parâmetro geométrico representado pela equação 5.6 e R o raio de curvatura dado pela equação 5.4. O mesmo autor vai mais longe e apresenta uma expressão para o fator de flexibilidade (K^*), onde inclui a influência dos tubos tangentes na rigidez da curva.

$$K^* = 1 + (K - 1) \sqrt{1 - \left(\frac{\gamma - \beta}{\gamma} \right)^2} \quad (5.9)$$

Onde β é o ângulo de curvatura total, e γ é um parâmetro definido em função da espessura, t , e do diâmetro médio do tubo, D , dado por:

$$\gamma = 1200 \sqrt{\frac{t}{D}} \quad (5.10)$$

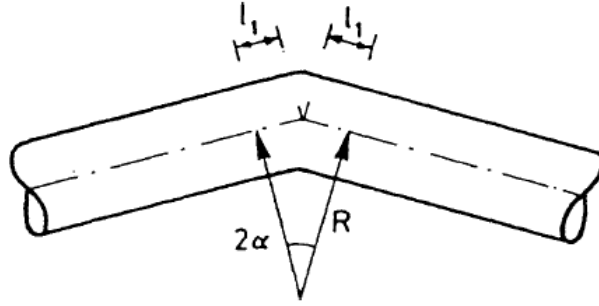


Figura 5.2: Geometria de uma curva segmentada simples.

5.3 NEN 3650 (1992)

A norma *NEN 3650* consiste de um número de regras de projeto de *pipelines*, proposta e aceite pelo Instituto Holandês de Normalização em 1992. Esta norma inclui regras para o *design* de curvas segmentadas simples, com uma só interseção, ou múltiplas, constituídas pela interseção de mais do que dois segmentos.

No entanto, esta norma restringe o âmbito de aplicação a curvas dentro dos seguintes parâmetros geométricos:

$$2\alpha \leq 25^\circ \quad (5.11)$$

$$\frac{R}{r} \geq 2.5 \quad (5.12)$$

Para o caso de curvas segmentadas simples, como a ilustrada na figura 5.2, o cálculo do fator de flexibilidade é realizado com base no proposto por *Gresnigt*, através da expressão 5.9. Acrescenta-se porém o caso de sistemas sujeitos a pressão interna, onde a expressão a reter é a indicada na equação 5.7, substituindo K por K^* .

O caso de curvas segmentadas múltiplas divide-se em duas situações, tal como definido na norma *ANSI/ASME B31.8*, curvas com espaçamento curto e curvas com espaçamento longo.

Consideram-se curvas com espaçamento longo quando $S > 2l_1$, onde l_1 é obtido por:

$$l_1 = \frac{r}{2}(1 + \tan \alpha) \quad (5.13)$$

Neste caso, deve-se verificar se existe interação entre interseções individuais da seguinte forma.

- (a) Primeiro calcula-se o ângulo de rotação entre A e B, assumindo interseções individuais, como mostra a figura 5.3, da forma:

$$\varphi_{AB}^a = \frac{M}{EI}(4K^*l_1 + 2S - 4l_1) \quad (5.14)$$

Onde K^* é dado pela expressão 5.9 e $S = r(1 + \tan \alpha)$.

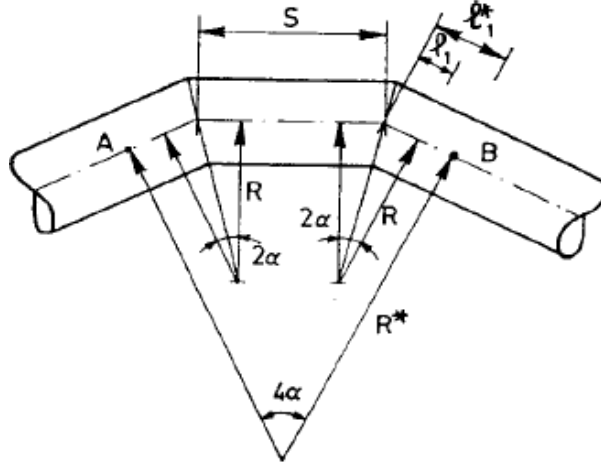


Figura 5.3: Geometria de uma curva segmentada múltipla.

- (b) Em segundo lugar, calcula-se a rotação entre A e B, mas desta vez tomando o conjunto como uma só curva, através das seguintes expressões.

$$R^* = \frac{S}{2} \cot \alpha \quad (5.15)$$

$$\lambda = \frac{tR^*}{r^2} \quad (5.16)$$

O fator de flexibilidade K^* é obtido substituindo a equação 5.16 em 5.8, que por sua vez é substituído na expressão 5.9, onde β é então igual a 4α e γ dado pela expressão 5.10.

Assim, o ângulo de rotação pretendido é dado por:

$$\varphi_{AB}^b = \frac{M}{EI} (K^* 2S) \quad (5.17)$$

Se $\varphi_{AB}^a > \varphi_{AB}^b$, então assume-se que não existe interação, seguindo-se a formulação descrita para curvas segmentadas simples. Caso contrário as regras descritas na alínea (b) aplicam-se. Note-se que para curvas com espaçamento curto, onde $S < 2l_1$, também se aplicam os resultados da alínea (b).

6

Caso de Estudo: Curva Segmentada Sujeita a Flexão Negativa no Plano da Curva

A partir deste capítulo dá-se início à descrição de um caso de estudo, sobre o qual é realizada a comparação da solução analítica obtida no capítulo 4, com a solução numérica analisada no capítulo 7, e com dados obtidos experimentalmente da forma apresentada no capítulo 8. Este caso de estudo incide na análise da flexibilidade de uma curva segmentada de 90° e dois segmentos. Primeiro, fica nas secções seguintes definida a geometria analisada e os parâmetros dos materiais, posteriormente associados aos modelos numéricos e analíticos desenvolvidos ao longo desta dissertação.

6.1 Parâmetros Geométricos e Condições de Carregamento

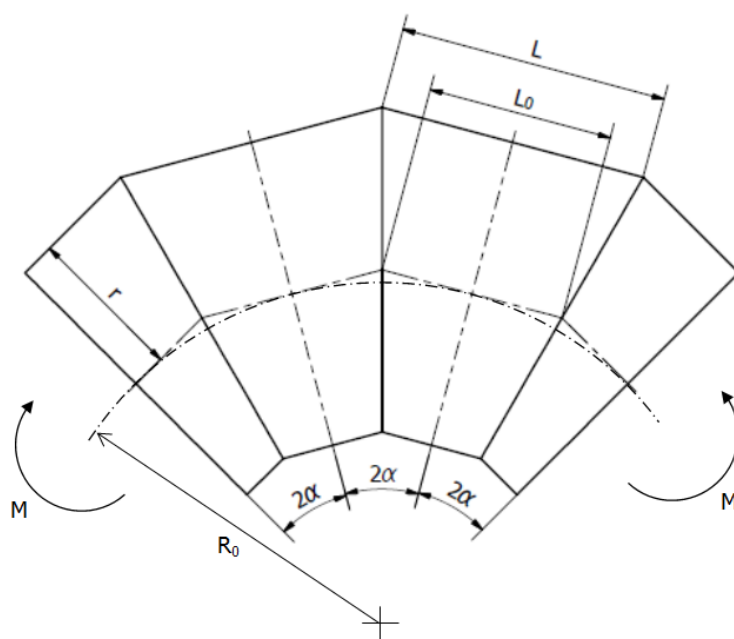


Figura 6.1: Geometria da curva segmentada em estudo.

A figura 6.1 mostra a geometria da curva segmentada analisada nesta dissertação. Assim, os parâmetros geométricos, de acordo com as variáveis definidas nos capítulos 4.2 e 4.3, são:

- Diâmetro, $D = 101.0mm$;
- Raio médio, $r = 49.75mm$;
- Espessura, $t = 1.5mm$;
- Ângulo de segmentação, $\alpha = 15^\circ$;
- Comprimento máximo do segmento, $L = 87.0mm$;
- Comprimento do segmento na sua geratriz, $L_0 = 60.0mm$;

Note-se que L_0 não é definido arbitrariamente. Segundo *Gresnigt* [3], e de acordo com o publicado na norma ANSI/ASME B31.8, para curvas multi-segmentadas (ver figura 4.3), tem-se que,

$$L_0 < r(1 + \tan \alpha) \Leftrightarrow L_0 < 49.75(1 + \tan 15^\circ) \Leftrightarrow L_0 < 63mm \Rightarrow L_0 = 60mm \quad (6.1)$$

De onde se obtém L , fazendo,

$$L = 2r \tan \alpha + L_0 \Leftrightarrow L = 2 \cdot 49.75 \cdot \tan 15^\circ + 60 \Leftrightarrow L = 87mm \quad (6.2)$$

Como o cálculo analítico do fator de flexibilidade da curva segmentada é obtido através da analogia com a curva lisa, tem de se definir o raio de curvatura equivalente, R_0 , que se obtém de,

$$R_0 = \frac{L_0}{2} \cdot \cot \alpha \Leftrightarrow R_0 = \frac{60}{2} \cdot \cot 15^\circ \Leftrightarrow R_0 = 112mm \quad (6.3)$$

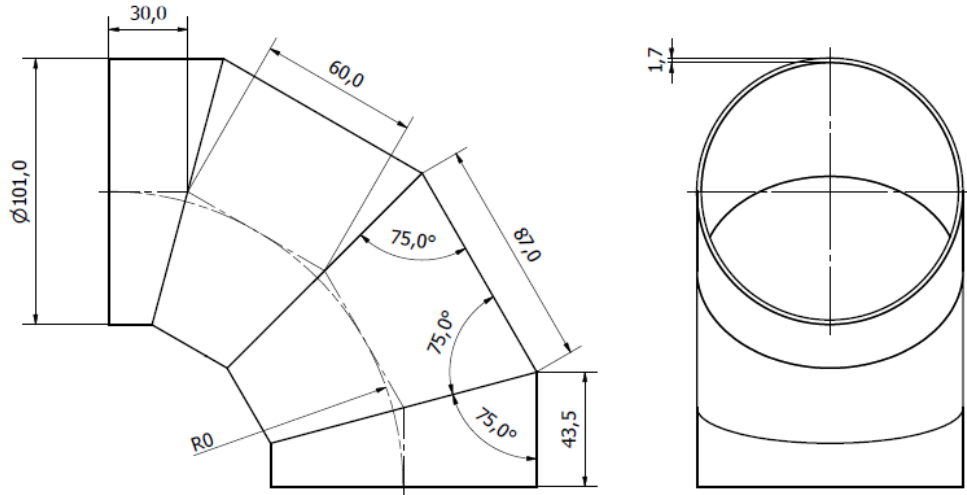


Figura 6.2: Dimensões da curva segmentada em estudo.

O tipo de carregamento aplicado à estrutura, neste caso de estudo e como tem vindo a ser sublinhado ao longo da dissertação, é referente ao caso de flexão negativa no plano da curva. Isto é, a curva está sujeita a um momento fletor, M , simétrico em cada extremidade da curva, que provoca a diminuição do ângulo α , conforme indicado na figura 6.1.

O desenho técnico de definição dimensional da curva segmentada em estudo encontra-se no anexo J.

6.2 Materiais

Os modelos de material metálico e compósito a seguir apresentados, são de vital importância para a conclusão bem sucedida deste estudo. Uma vez que a análise experimental foi realizada sobre um espécime metálico, a correta definição do modelo associado a este material toma especial importância, de forma a se obter a melhor concordância possível entre o ensaio experimental e as análises numérica e analítica.

6.2.1 Modelo Metálico

A constante elástica do material metálico, constituinte do tubo utilizado na fabricação do espécime sobre o qual foi realizado o procedimento experimental, foi obtida recorrendo a um ensaio de compressão radial numa máquina de ensaios universal *Shimadzu*, conforme ilustrado na figura 6.3. Os dados então obtidos são analisados segundo formulações de dois autores distintos, *Young* e *Feodosiev*.

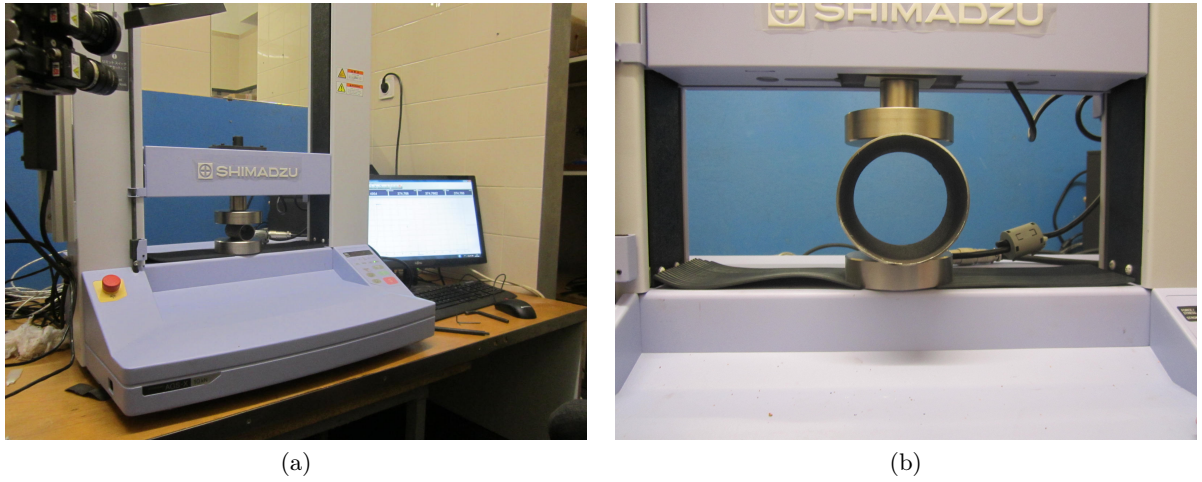


Figura 6.3: Ilustrações do ensaio de compressão radial.

De acordo com *Young et al* [4], a diminuição do diâmetro devida à deflexão δw na linha de ação da carga, provocada por um carregamento concentrado e diametralmente oposto, a meio comprimento de um elemento tubular de extremidades abertas, tal como representado na figura 6.4, é dada por:

$$\delta w = 6.5 \frac{P}{E \cdot t} \left(\frac{R}{t} \right)^{3/2} \left(\frac{L}{R} \right)^{-3/4} \quad (6.4)$$

Onde P é a carga, t é a espessura, R é o raio médio, L é o comprimento e E é o módulo de *Young*, variável que se pretende obter.

Uma vez que a incógnita é o módulo de *Young*, reescreve-se a expressão anterior em ordem à mesma, obtendo-se assim uma expressão para E em função do par de valores δw e P , dada por:

$$E = 6.5 \frac{P}{\delta w \cdot t} \left(\frac{R}{t} \right)^{3/2} \left(\frac{L}{R} \right)^{-3/4} \quad (6.5)$$

Segundo o mesmo autor, a expressão 6.4 é válida nos seguintes intervalos:

$$1 < L/R < 18 \quad (6.6)$$

$$R/t > 10 \quad (6.7)$$

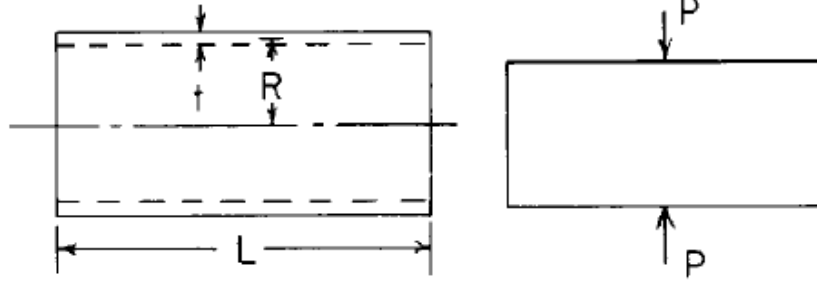


Figura 6.4: Representação esquemática do teste de compressão radial elaborado [4].

O espécime tubular reto testado possui as dimensões constantes da tabela 6.1.

Tabela 6.1: Dimensões do espécime testado sob compressão radial.

L (mm)	R (mm)	t (mm)
138.5	49.75	1.5

Dadas as dimensões do espécime, verificam-se as condições de aplicação da expressão 6.4, com $L/R = 2.79$ e $R/t = 33.1$.

Segundo *Feodosiev* [53], para um elemento tubular nas mesmas condições de carregamento referidas em relação à formulação anterior, a diminuição do diâmetro do tubo, devida à deflexão δw , é dada por:

$$\delta w = \frac{P \cdot R^3}{EI} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \right) \quad (6.8)$$

Reescrevendo a expressão anterior em ordem ao módulo de *Young*, fica,

$$E = \frac{P \cdot R^3}{\delta w I} \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \right) \quad (6.9)$$

Na expressão anterior, I é o segundo momento de área, tal que:

$$I = \frac{L \cdot t^3}{12} \quad (6.10)$$

Os ensaios foram realizados com a intenção de se obter apenas a resposta elástica do material, impondo uma carga limite máxima (P) de 500N, deslocando o êmbolo superior da máquina de testes a uma velocidade $v = 5mm/min$. Antes de se dar início ao ensaio, aplica-se uma pré-carga de forma a compensar possíveis folgas da máquina de ensaios, assim como o ajustamento inicial do êmbolo à superfície do espécime. Deste modo é esperado um comportamento linear entre a força e o deslocamento consequente.

Os resultados do ensaio de compressão radial são importados para o ambiente do *software Matlab R2013a*, onde se procede ao tratamento dos dados obtidos. O gráfico, ilustrado na figura 6.5, mostra as curvas Força-Deslocamento (FD) obtidas no decorrer de três ensaios consecutivos.

A cada par de valores, força e deslocamento, corresponde um valor de módulo de *Young*, obtido através das expressões 6.5 e 6.9, formulações de *Young* e *Feodosiev* respectivamente. Deve-se notar que uma vez que o êmbolo inferior não se move, a diminuição do diâmetro do tubo, δw , é igual ao deslocamento vertical do êmbolo superior. Como se pode observar, os resultados são perfeitamente lineares e apresentam uma reprodutibilidade elevada, o que representa um bom indicador da fiabilidade dos ensaios realizados.

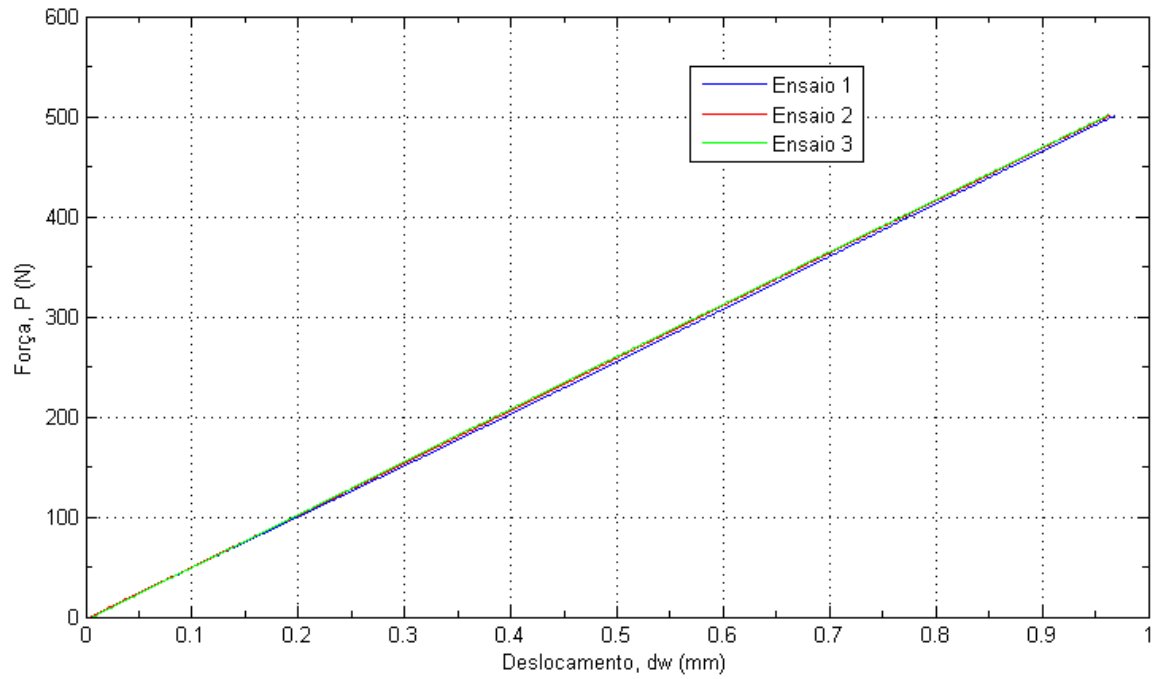


Figura 6.5: Resultados do ensaio de compressão radial.

O gráfico da figura 6.6 mostra a variação do módulo de *Young*, com cada um dos pares força-deslocamento obtidos no ensaio de compressão radial. Este gráfico é apresentado em função do deslocamento apenas por uma questão de facilitar a sua análise e correlação com o gráfico força-deslocamento da figura 6.5.

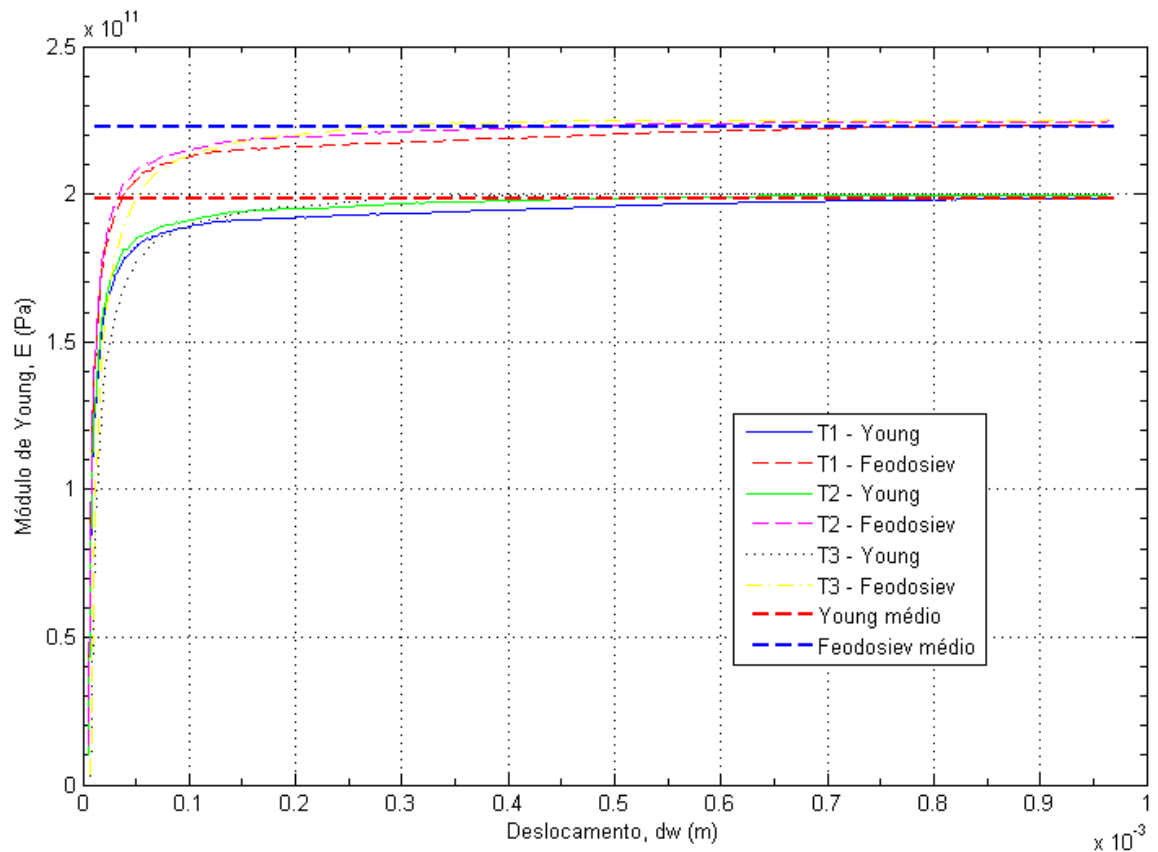


Figura 6.6: Gráfico do módulo de *Young* em função do deslocamento.

Observando o gráfico anterior percebe-se que as formulações usadas na estimativa do módulo de *Young* são estáveis, convergindo rapidamente, mas produzem resultados bastante díspares. Os valores considerados são obtidos efetuando a média da dita constante elástica na zona de convergência das curvas, para cada formulação. Da tabela 6.2 constam estes mesmos valores.

Tabela 6.2: Módulo de *Young* (E), mediante formulações de *Young* e *Feodosiev*.

<i>Young</i> (GPa)	<i>Feodosiev</i> (GPa)
198.125624872	222.796742638

Dada a diferença observada nos resultados torna-se necessária a sua validação, realizando uma comparação com dados obtidos por simulação numérica, realizada em *software* comercial *Abaqus CAE 6.10*. Na análise por elementos finitos efetuada, definem-se dois materiais com comportamento elástico de módulo de *Young* igual ao aproximado por cada uma das formulações testadas e coeficiente de *Poisson* $\nu = 0.29$.

As condições de fronteira e carregamento são definidas de forma a simular as condições do teste de compressão radial realizado. De acordo com a figura 6.7, as condições de fronteira são definidas da seguinte forma.

Considerando os deslocamentos nas direções (x, y, z) como (u_1, u_2, u_3) , nos nós do plano $y = -49.75mm$, a vermelho, tem-se,

$$u_2 = u_3 = 0 \quad (6.11)$$

De forma a simular a forma como a base do espécime está apoiado firmemente no êmbolo inferior, permitindo deslocamentos de *Poisson* na direção x . De modo a eliminar os movimentos de corpo rígido de todo o modelo, aplica-se nos nós do plano $x = 0$ a condição,

$$u_1 = 0 \quad (6.12)$$

Os nós no plano $y = 49.75mm$, a azul, devem poder deslocar-se na direção y , mantendo-se no plano $z = 0$ de forma a se obter simetria na forma de ovalização do modelo relativamente a este plano. Logo, a condição a aplicar a estes nós é a seguinte.

$$u_3 = 0 \quad (6.13)$$

A última condição de fronteira aplicada, referente ao carregamento, é definida recorrendo a uma restrição do tipo *Equation*, a qual permite ligar um grau de liberdade de um conjunto de nós a outro grau de liberdade de um ponto de referência. Assim, restringe-se o deslocamento na direção y do ponto de referência (RP) ao deslocamento na mesma direção dos nós a azul (A), segundo a seguinte equação.

$$A - RP = 0 \quad (6.14)$$

Desta forma, ao aplicar um deslocamento $u_2 = -0.95mm$ ao ponto de referência, este vai transmitir-se a todos os nós a azul. Este procedimento tem a vantagem de se poder retirar o histórico da força aplicada em função do deslocamento, ao longo da simulação, diretamente do ponto de referência.

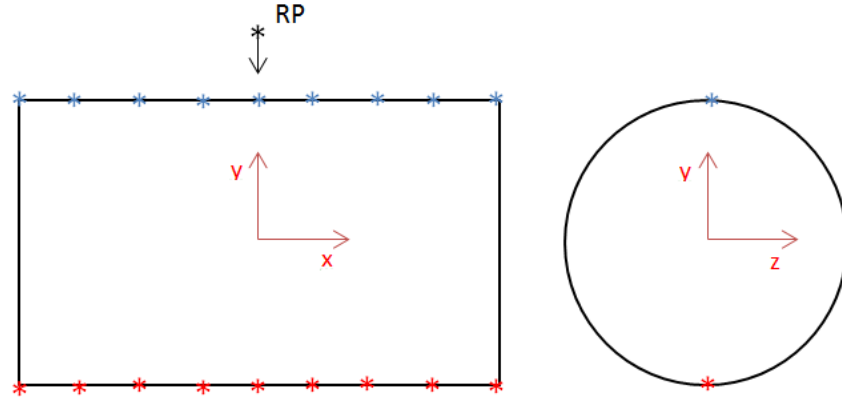


Figura 6.7: Representação esquemática dos nós onde são aplicadas as condições de fronteira do problema.

Os resultados da simulação numérica do ensaio de compressão radial são apresentados na figura 6.8, em comparação com a curva força-deslocamento obtida experimentalmente, verificando-se uma aproximação bastante boa. O erro máximo entre os dados experimentais e os obtidos através da simulação numérica é de 3.8%. Assim, o modelo do material metálico a utilizar na simulação numérica da curva segmentada sob flexão negativa no plano de curvatura é o descrito na tabela 6.3.

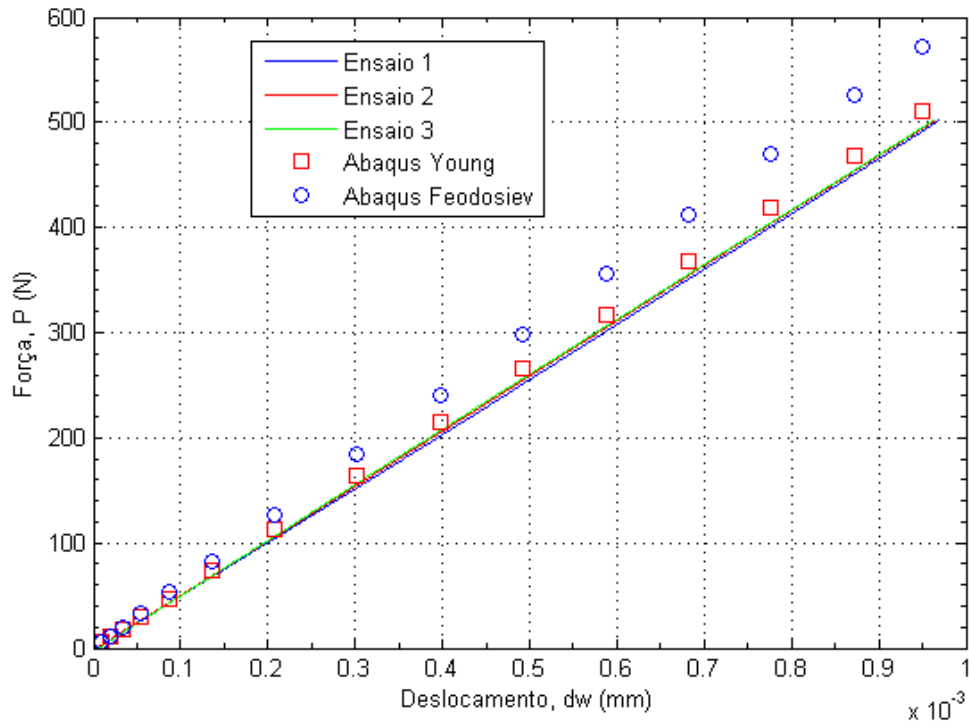


Figura 6.8: Comparação entre a curva FD real e a obtida através da simulação por elementos finitos.

Tabela 6.3: Parâmetros do modelo material metálico.

Módulo de <i>Young</i> , E (GPa)	Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν
198.125624872	0.29

6.2.2 Modelo Compósito

No que toca a tubagens compósitas, em especial as usadas em *pipelines* de transporte de fluidos, a fibra de vidro é o tipo de reforço predominante, aplicado em mais de 90% das tubagens compósitas fabricadas por enrolamento filamentar [6]. Os tipos de resina mais usuais são:

- **Resina de poliéster normal** - Classificado como poliéster ortoftálico, tem uma grande aplicação na indústria de GRP. Possui resistência mecânica e à corrosão moderadas. Cura à temperatura ambiente e é a resina de mais baixo custo [6];
- **Resina de poliéster melhorado** - Classificado como poliéster isoftálico, possui boa resistência mecânica e à corrosão, mas é mais caro que a resina de poliéster normal [6];
- **Resina de vinilester** - Trata-se de uma combinação química de epóxido e poliéster, com muito boa resistência à corrosão e superior resistência mecânica e dureza, a um maior custo. Amplamente usada como revestimento interior de tubagens de GRP [6];
- **Resina de bifenol** - Um tipo de fumarato, usado em sistemas que funcionam em ambientes severos dada a sua elevada resistência à corrosão. Tem a capacidade de trabalhar a temperaturas mais elevadas;
- **Resina fenólicas** - Possui excelentes propriedades contra o fogo, atuando como um retardante de baixa emissão de fumos e menor deformação. O custo é bastante elevado, sendo aplicado em tubagens em campos de petróleo [6];
- **Resina de epóxido** - Existe uma grande variedade deste tipo de resinas, as quais possuem as melhores características de resistência mecânica, apresentando também boa resistência química. Geralmente necessita de ser curado por processos de transmissão de calor. O custo desta resina é dos mais elevados.

Quanto ao tipo de reforço, as fibras que predominam no mercado são:

- **E-Glass** - Classe mais usual de fibra de vidro, com boa resistência mecânica, baixo módulo de elasticidade e baixo custo, é a fibra mais usada no fabrico de tubagens compósitas por enrolamento filamentar [6];
- **S-Glass** - Classe de fibra de vidro superior ao *E-Glass*, com módulo de elasticidade e custo mais elevados, é usualmente empregue em reservatórios de pressão de alto desempenho [6];
- **Aramida** - Possui boa resistência mecânica, com um módulo de elasticidade e custo mais elevados que as fibras *S-Glass* mas menor densidade, com cerca de um terço da densidade das fibras de vidro. Além disso, apresenta uma tolerância elevada ao impacto e danos físicos, mas possui baixa resistência à compressão e corte [6];
- **Carbono** - É uma fibra com uma ampla gama de resistências mecânicas. Possui baixa tolerância ao impacto e danos físicos, mas proporciona as melhores propriedades de rigidez e resistência à tração. Apresenta o módulo de elasticidade mais elevado de entre as fibras descritas, com uma densidade intermédia, cerca de dois terços da densidade das fibras de vidro. É, contudo, o mais caro reforço filamentar disponível no mercado [6].



Figura 6.9: Materiais base, em bruto, para o fabrico de tubagem compósita [46].

No caso de estudo realizado no âmbito desta dissertação é considerado um modelo baseado em propriedades de um material compósito real, composto por fibras de vidro do tipo *E-Glass* produzidas pela *Fiber Glass Industries, Inc.*, impregnadas pela resina *EPIKOTE 862*, do tipo epóxido de bisfenol-F e agente endurecedor *EPIKURE W*, do tipo amina aromática [54]. As tabelas 6.4-2 indicam as propriedades mecânicas das fibras e matriz consideradas.

Tabela 6.4: Propriedade mecânicas das fibras *E-Glass* [54].

Tipo de fibra	E_f (GPa)	G_f (GPa)	ν_f
<i>E-Glass</i>	73.09	30.13	0.33

Tabela 6.5: Propriedade mecânicas da matriz *EPIKOTE 862/EPIKURE W* [54].

Propriedade	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidade axial	E_m	3.45 (GPa)
Módulo de corte	G_m	1.31 (GPa)
Coefficiente de <i>Poisson</i>	ν_m	0.28

A tabela 6.6 indica as propriedades mecânicas inerentes a este modelo de material compósito, de acordo com a notação definida na figura 4.8-b descrita na secção 4.3.

Tabela 6.6: Propriedade mecânicas do compósito *E-Glass/E* [54].

Propriedade	Símbolo	Valor
Módulo de elasticidade axial	E_x	38.30 (GPa)
Módulo de elasticidade tangencial	E_y	10.56 (GPa)
Módulo de elasticidade normal	E_z	10.56 (GPa)
Módulo de corte	G_{xy}	3.96 (GPa)
Módulo de corte	G_{xz}	3.96 (GPa)
Módulo de corte	G_{yz}	2.45 (GPa)
Coeficiente de <i>Poisson</i>	ν_{xy}	0.29
Coeficiente de <i>Poisson</i>	ν_{xz}	0.29
Coeficiente de <i>Poisson</i>	ν_{yz}	0.42
Fração volúmica de fibra	V_f	0.50

Simulação Numérica Por Análise de Elementos Finitos

A simulação por elementos finitos, do caso de estudo indicado no capítulo 6, foi realizada recorrendo ao *software Abaqus CAE 6.10*. Durante este capítulo são definidos todos os parâmetros necessários à realização desta análise.

7.1 Definição do Modelo da Curva Segmentada

Uma vez que este estudo é baseado na análise de um componente tubular de paredes finas, todas as *parts* constituintes do modelo da curva segmentada são do tipo casca de revolução, deformável, construído num espaço tridimensional. Neste espaço é definido o comprimento máximo do segmento ($L = 87mm$), através de uma linha com essa dimensão, distanciada de $50.5mm$ do eixo de revolução, definindo o raio do tubo (r). Em seguida, são definidos dois eixos inclinados de um ângulo $\alpha = \pm 15^\circ$, que servem de direção normal a dois planos, que por sua vez “cortam” o tubo nas suas extremidades através de uma operação denominada de *Cut Extrude*. Desta forma obtém-se o modelo de um segmento completo, conforme ilustrado na figura 7.1.

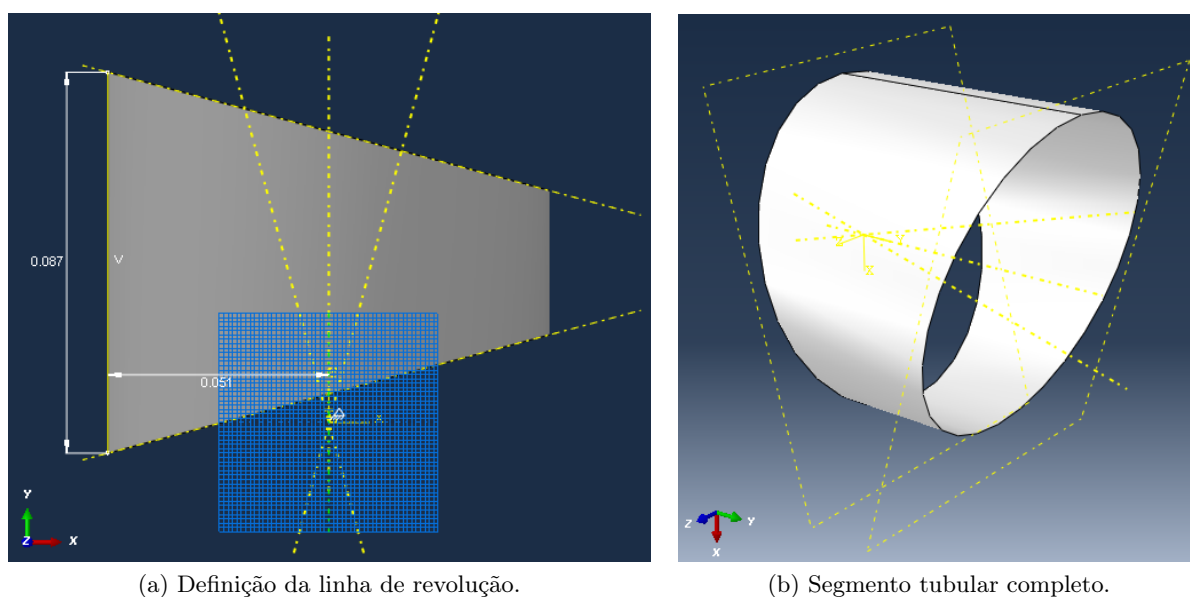


Figura 7.1: Geometria do modelo do segmento completo.

O modelo dos segmentos das extremidades da curva segmentada, obtém-se exatamente da mesma forma que o modelo tridimensional do segmento completo, exceto que desta vez, a linha de revolução tem metade do comprimento L e apenas se define um plano de corte numa das extremidades.

No módulo *Assembly* são referenciados quatro elementos, dois de cada tipo de segmento, os quais são posicionados conforme a posição relativa entre cada um dos segmentos, aplicando restrições posicionais. Em seguida, através da operação *Merge Instances*, obtém-se uma *part* correspondente à geometria da curva segmentada completa, ilustrada na figura 7.2.

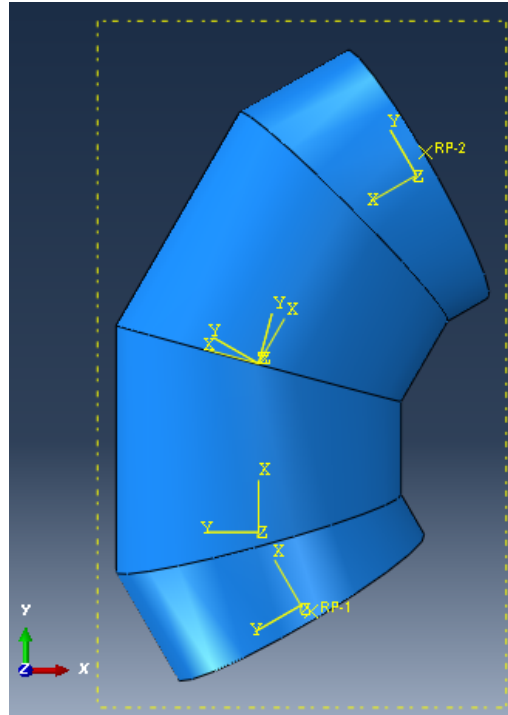


Figura 7.2: Modelo da curva segmentada completa.

7.2 Definição do Material

Para este estudo, o material é tomado como perfeitamente elástico, visto que a análise analítica é realizada neste domínio e o procedimento experimental se refere apenas a deslocamentos capazes de deformar a curva elasticamente. Desta forma, apenas se torna necessário definir as constantes elásticas dos materiais compósito e metálico em estudo.

No caso do modelo metálico, define-se no *Abaqus* um material com comportamento elástico, do tipo isotrópico, onde se introduzem as propriedades obtidas durante os ensaios descritos na secção 6.2.1, novamente referenciadas na tabela 7.1. Depois de criado o material, é associada à *part* da curva completa, uma secção com o modelo material metálico e espessura $1.5mm$.

Tabela 7.1: Propriedades físicas do aço usado na análise experimental.

Módulo de <i>Young</i> , E (GPa)	Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν
198.125624872	0.29

Para o caso do modelo da curva compósita, define-se um material de comportamento elástico, do tipo “constantes de engenharia”, onde se inserem as constantes elásticas consoante a direção no material.

O referencial do material usado no *Abaqus* é semelhante ao definido na figura 4.8-b, diferindo apenas na notação do mesmo, onde o referencial ortogonal (x, y, z) passa a ser $(1, 2, 3)$.

O modelo material compósito é definido com base no que está apresentado na tabela 6.6 da secção 6.2.2. Uma vez que se trata de um material compósito, considera-se o caso de isotropia transversal, ou seja, $E_2 = E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13}$ e $G_{12} = G_{13}$.

Assim, as propriedades mecânicas independentes, inseridas no modelo compósito desta simulação, estão discretizadas na tabela 7.2.

Tabela 7.2: Constantes de engenharia introduzidas no modelo da curva compósita estudada.

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)
38.30	10.56	0.29	0.42	3.96	2.45

A secção do modelo da curva compósita é definida através do módulo *Composite Layup*, incluído no *software*. Desta forma, cria-se uma secção com 12 camadas, cada qual com $0.125mm$ de espessura. De acordo com *Xia et al* [29], o ângulo de enrolamento filamentar ótimo, para um rácio de tensão tangencial-radial de 2:1, é de 55° , pelo que esta é a orientação considerada para as camadas de material compósito. A sequência de empilhamento definida é do tipo $[(\pm 55^\circ)_6]$. Note-se que é estabelecido um número par de camadas, para que as propriedades sejam o mais homogêneas possível segundo a espessura, de forma a evitar eventuais questões relacionadas com “empenos” ou assimetrias na análise da curva segmentada compósita.

7.3 Definição dos Elementos

O tipo de elementos empregues na simulação numérica são do tipo *shell*, uma vez que se trata de um componente de paredes finas, onde a espessura é muito menor que as restantes dimensões. Este tipo de elemento deve ser usado em casos onde a flexibilidade de corte transversal é desprezível e as hipóteses de *Kirchhoff* devem ser satisfeitas com precisão. As características gerais do elemento usado são descritas em baixo, segundo a nomenclatura apresentada no *software*.

- Família do elemento - casca convencional;
- Ordem geométrica - quadrática;
- Elemento - tetraédrico de 8 nós, *S8R* (ver figura 7.3).

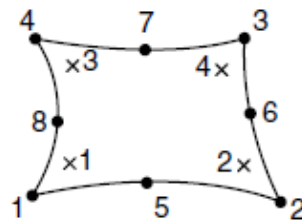


Figura 7.3: Número e pontos de integração de um elemento *S8R* [55].

A malha foi criada através da técnica de *Edge Seeding* [56], ou seja, são introduzidas “sementes” nos bordos e/ou arestas do modelo geométrico, que servem de pontos de ancoragem para os nós [55]. A figura 7.4 mostra um exemplo deste tipo de *seeding*. O controlo de geração da malha é realizado através do método de *Sweep Meshing*, onde o *software* cria internamente uma malha,

consoante as “sementes” introduzidas, e em seguida varre essa malha ao longo de uma trajetória de varrimento definida pelo utilizador [55].

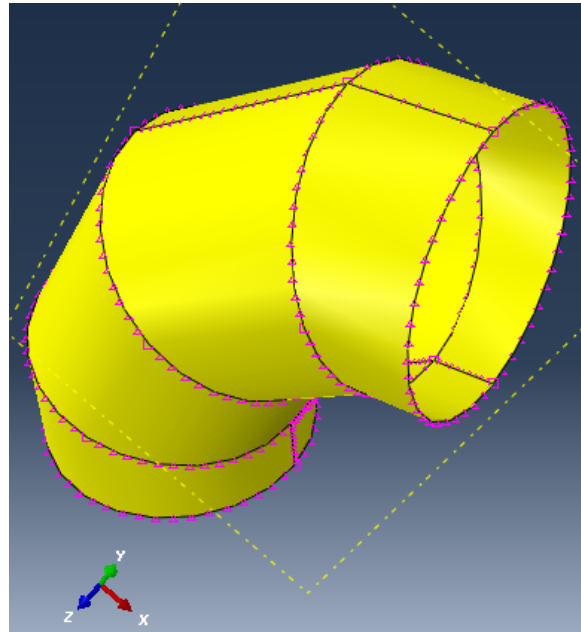


Figura 7.4: Exemplo de aplicação da técnica de *edge seeding*, no modelo geométrico da curva segmentada.

Dado que o método dos elementos finitos é um método de aproximação, quanto menor for o tamanho dos elementos mais próxima fica a solução do valor real. Por outro lado, a diminuição do tamanho dos elementos aumenta o tempo de cálculo consideravelmente. *Rizzo et al* [57] estudou o efeito do tamanho dos elementos na solução final, concluindo que para uma solução ser admissível o erro deve ser inferior a 0.5%.

Neste contexto, é levado a cabo um pequeno estudo de convergência, de forma a alcançar um compromisso aceitável entre o tempo de computação e a precisão dos resultados obtidos. Para tal são testadas várias malhas, com um número variável de elementos, sujeitos às mesmas condições de fronteira e carregamento. Os resultados deste estudo encontram-se em baixo.

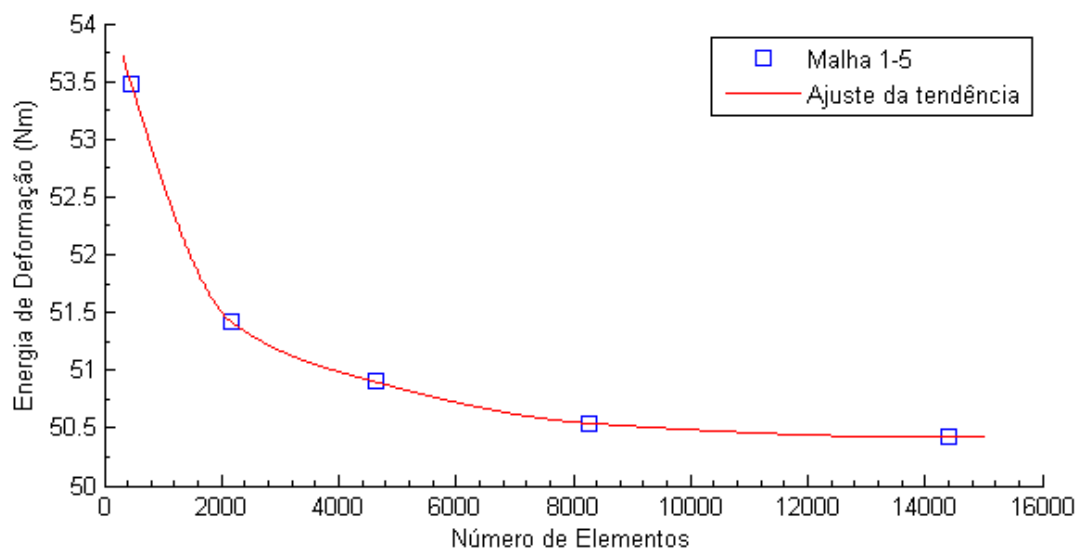


Figura 7.5: Resultados gráficos da análise de convergência.

Tabela 7.3: Resultados da análise de convergência.

Malha (<i>i</i>)	NE	Nº de Nós	SE (Nm)	Erro (%)	TC (s)
1	462	1452	53.4789	3.8370	26
2	2160	6624	51.4269	1.0201	87
3	4620	14070	50.9023	0.7088	207
4	8280	25116	50.5415	0.2428	375
5	14400	43560	50.4188	-	405

NE- Número de elementos; **SE**- Energia de deformação (*Strain energy*); **TC**- Tempo de cálculo.

Com base nos testes realizados, verificou-se que a malha 4 possui um erro de cerca de 0.24% (ver tabela 7.3), um erro bastante inferior ao admissível, tornando-se portanto a malha usada durante os estudos afetos a esta dissertação. A tendência de convergência está bem patente na figura 7.5, onde se pode visualizar a diminuição progressiva do erro, consoante o número de elementos aumenta.

O erro é obtido através da expressão:

$$Erro = \frac{SE_{(i)} - SE_{(i+1)}}{SE_{(i+1)}} \times 100 \quad (7.1)$$

Na figura 7.6 são apresentadas três das cinco malhas testadas. A malha ilustrada na figura 7.6-a corresponde àquela de maior erro, a figura 7.6-c é referente à malha mais refinada e, finalmente, a malha representada na figura 7.6-b é a malha de dimensões ótimas para este estudo.

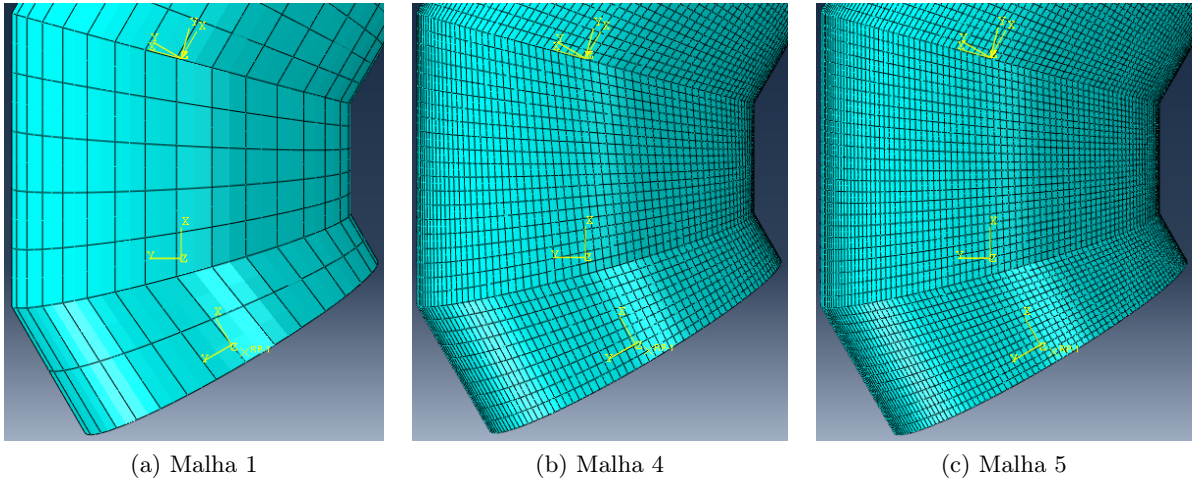


Figura 7.6: Exemplos de malhas de elementos finitos testadas.

7.4 Definição das Condições de Fronteira e Carregamento

As condições de fronteira são de extrema importância, pois a sua definição influencia fortemente os resultados finais da simulação numérica. No caso do presente estudo, a correta definição destas condições é algo complicada, uma vez que as extremidades da curva segmentada devem ser restringidas de modo a permitir a ovalização da secção transversal, sem que esta sofra efeitos de distorção. Este tipo de condições são implementadas através de acoplamentos cinemáticos e distribuídos, do inglês *Kinematic Constraint* e *Distributing Constraint*, descritos posteriormente.

De acordo com o representado na figura 7.7, o plano $z = 0$ é um plano de simetria que atravessa longitudinalmente toda a curva. Todos os nós neste plano devem obedecer a,

$$u_z = \phi_x = \phi_y = 0 \quad (7.2)$$

O movimento de rotação de qualquer plano transversal da curva é apenas permitido no eixo z e simétrico em relação ao plano $x = 0$, que não sofre qualquer rotação. Assim, para todos os nós nesse plano, tem-se,

$$u_x = \phi_y = \phi_z = 0 \quad (7.3)$$

Na extremidade da curva são aplicadas condições de fronteira orientadas com o sistema de eixos (x', y', z') . A extremidade oposta está sujeita exatamente ao mesmo tipo de restrições, mas rodadas relativamente ao eixo z' , de forma a que o plano $x' = 0$ seja coincidente com o plano normal à secção transversal da extremidade.

De modo a impôr estas condições são introduzidos dois pontos de referência, um para cada extremidade, para representar o movimento do plano terminal respetivo. Estes pontos possuem as componentes de deslocamento $u_{x'}$ e $u_{y'}$, e rotação $\phi_{z'}$, como graus de liberdade. A imposição da flexão negativa no plano da curva é modelada prescrevendo uma rotação, $\phi_{z'} = d\alpha$, no nó/ponto de referência. A rotação é prescrita em vez de um momento, de forma a prevenir alguma instabilidade do modelo.

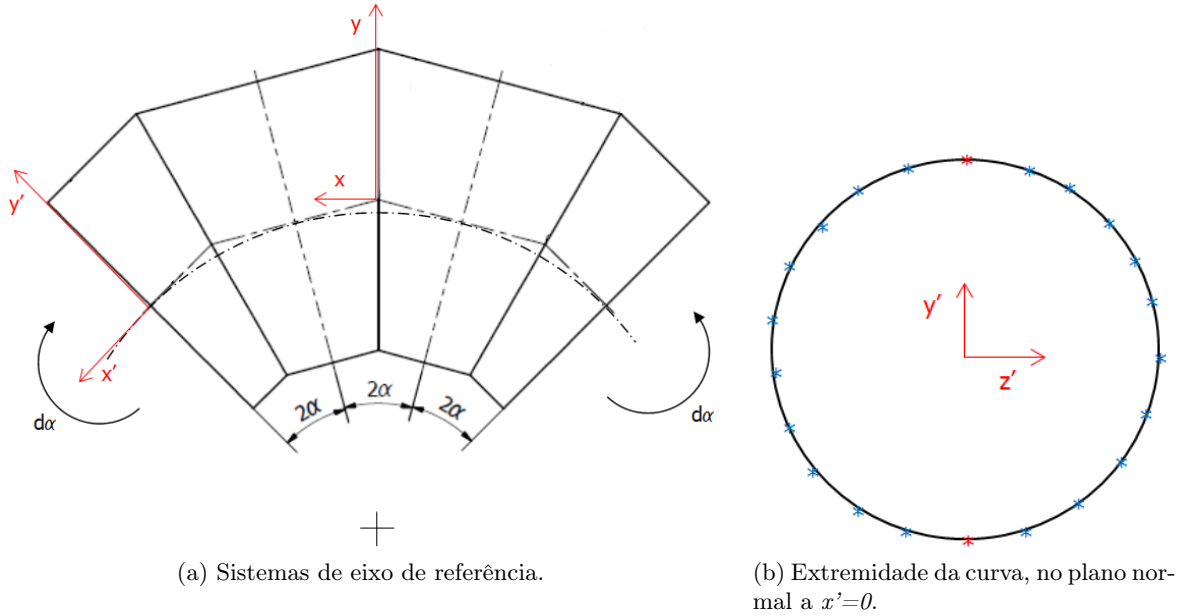


Figura 7.7: Ilustração dos sistemas de coordenadas, base para as condições de fronteira e carregamento.

Um acoplamento do tipo cinemático, tal como o nome indica, vincula o movimento de um conjunto de nós a um nó de referência [58]. Este tipo de acoplamento pode ser aplicado de modo a garantir a simetria dos deslocamentos dos nós, nos planos terminais, em relação aos planos y' e z' , permitindo simultaneamente a ovalização da secção transversal da curva. Os nós referidos devem permanecer coplanares em relação ao plano transversal terminal, cuja orientação é determinada pela rotação do nó de referência.

Tal condição é implementada ligando os nós dos planos terminais aos pontos de referência respetivos, de forma a que os primeiros sigam o movimento de rotação associado ao seu nó de referência. Como as direções das restrições em (x', y', z') rodam com a referência, também os planos definidos por estas o fazem. Assim, a normal ao plano terminal inicial é a direção x' , contudo, esta roda sobre o eixo z' de acordo com o movimento do ponto de referência, deixando os nós do plano terminal livres de se deslocarem nas direções y' e z' .

Considerando que os asteriscos, na figura 7.7-b, representam os nós do plano terminal, definem-se dois acoplamentos cinemáticos. O primeiro, apenas nos nós a vermelho, define-se

de forma a restringir todos os graus de liberdade, exceto na direção y' . Ao passo que o segundo acoplamento, restringe o movimento de translação x' e das rotações $\phi_{y'}$ e $\phi_{z'}$, dos nós a azul.

Da forma descrita, conseguem-se as condições pretendidas, restando apenas a supressão do movimento de corpo rígido na direção y . O dito movimento de corpo rígido pode ser removido restringindo o deslocamento médio de todos os nós do plano terminal rotativo na direção y' , através de um acoplamento distribuído [59].

7.5 Definição do Modelo do Tubo Reto Equivalente

Durante a avaliação analítica sobre o caso de estudo apresentado no capítulo anterior é possível obter uma estimativa do fator de flexibilidade que, tratando-se de um parâmetro obtido indiretamente, não é possível calcular diretamente por meio de uma qualquer análise por elementos finitos. Deste modo, torna-se essencial a realização de um procedimento adicional que permita o cálculo do fator de flexibilidade através de uma análise numérica por elementos finitos.

Como ficou patente nos capítulos 4.2 e 4.3, o fator de flexibilidade da curva segmentada é obtido através das expressões 4.30 e 4.31. De facto, deve-se notar que a expressão 4.30, relativa ao momento fletor capaz de provocar a rotação das extremidades da curva negligenciando o efeito da ovalização da sua secção, é equivalente à obtida através da teoria de vigas aplicada ao cálculo de flexão de um tubo reto.

Para o caso de flexão de um tubo inicialmente reto, tal como representado na figura 7.8, segundo a teoria das vigas, temos:

$$M = \frac{EI}{R} \quad (7.4)$$

O raio de curvatura final R , pode ser dado por:

$$R = \frac{L}{\theta} = \frac{\alpha_0 R_0}{2d\alpha_0} \quad (7.5)$$

Onde $2\alpha_0$, R_0 e $2d\alpha_0$ são o ângulo de curvatura, raio de curvatura e deslocamento angular da curva segmentada, conforme descrito no capítulo 4.

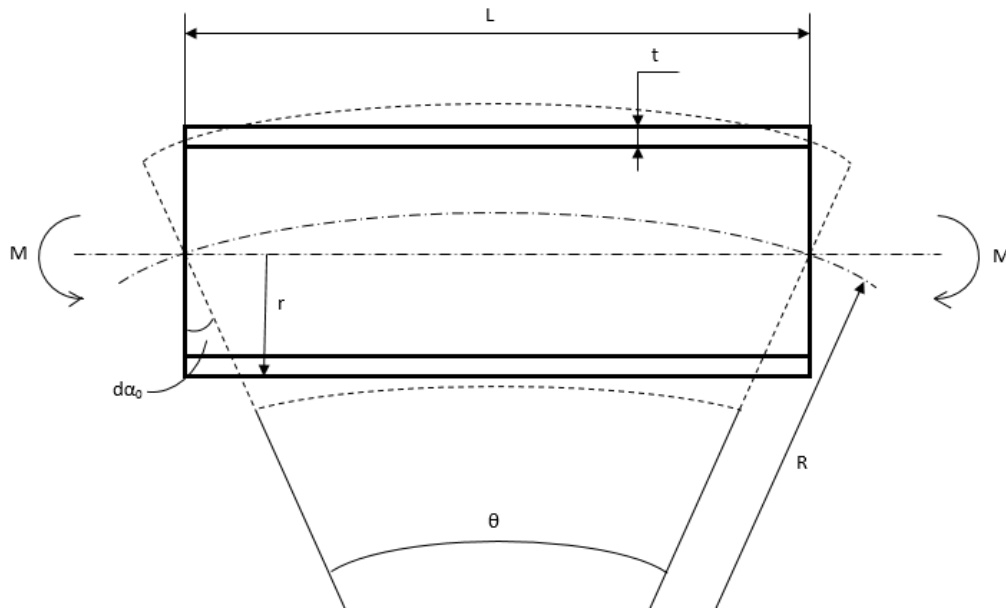


Figura 7.8: Representação esquemática da flexão de um tubo reto.

Dado que o segundo momento de área, I , se pode aproximar a,

$$I = \frac{E\pi r^3 t}{(1 - \nu^2)} \quad (7.6)$$

, temos que o momento $\overline{M}_{\text{sem Oval}}$ pode ser obtido diretamente através de uma análise por elementos finitos, por meio da analogia do tubo reto equivalente, ou seja, calculando o momento necessário à obtenção de um deslocamento angular $2d\alpha_0$ sobre as extremidades de um tubo reto, da mesma espessura e raio da curva segmentada em estudo e comprimento equivalente a esta.

Assim, à semelhança do modelo da curva segmentada definido na secção 7.1, o modelo do tubo reto equivalente é constituído por uma *part* do tipo casca de revolução, deformável, definida num espaço tridimensional. No dito espaço é criada uma linha de comprimento $L = R_0 \cdot 2\alpha_0 = 176\text{mm}$, ou seja, o comprimento equivalente ao da curva segmentada, a uma distância $r = 50.5\text{mm}$ do eixo de revolução, tal como ilustrado na figura 7.9.

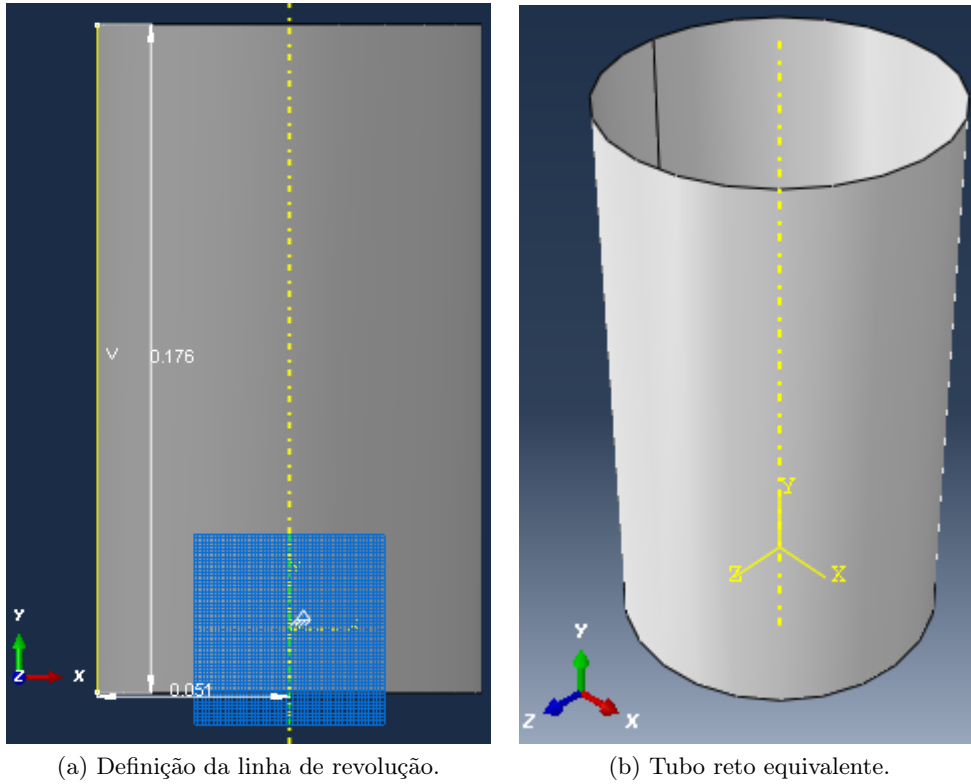


Figura 7.9: Geometria do modelo do tubo reto equivalente.

O material e tipo de elementos/malha a associar a este modelo são definidos da mesma forma que para a curva segmentada, apresentado nas secções 7.2 e 7.3 respetivamente. Uma vez que este modelo é bastante simples, o tempo de computação é bastante reduzido, até cerca de um minuto, pelo que não se torna relevante a realização de um estudo de convergência. Assim, a malha empregue na simulação do tubo reto equivalente é construída com 40 elementos ao longo da circunferência e 30 elementos na direção longitudinal, como apresentado na figura 7.10.

As condições de fronteira impostas a este modelo são em tudo semelhantes às definidas para o caso da curva segmentada. De acordo com o representado na figura 7.11, o plano $z = 0$ é um plano de simetria, pelo que todos os nós neste plano devem obedecer a,

$$u_z = \phi_x = \phi_y = 0 \quad (7.7)$$

Uma vez que são apenas permitidas rotações de qualquer plano transversal ao longo do eixo z e estas devem ser simétricas em relação ao plano $x = 0$, tem-se neste plano que,

$$u_x = \phi_y = \phi_z = 0 \quad (7.8)$$

Às extremidades são aplicadas condições de fronteira orientadas com o sistema de eixos (x', y', z') através de dois pontos de referência, um por cada extremidade, os quais são acoplados ao seu plano terminal respetivo por meio de ligações do tipo cinemático e distribuído, da mesma forma que para o modelo da curva segmentada descrito na secção anterior.

Dos anexos B e C constam os códigos implementados para a análise por elementos finitos no *software Abaqus CAE 6.10*, da curva segmentada e tubo reto equivalente, através de uma malha simplificada.

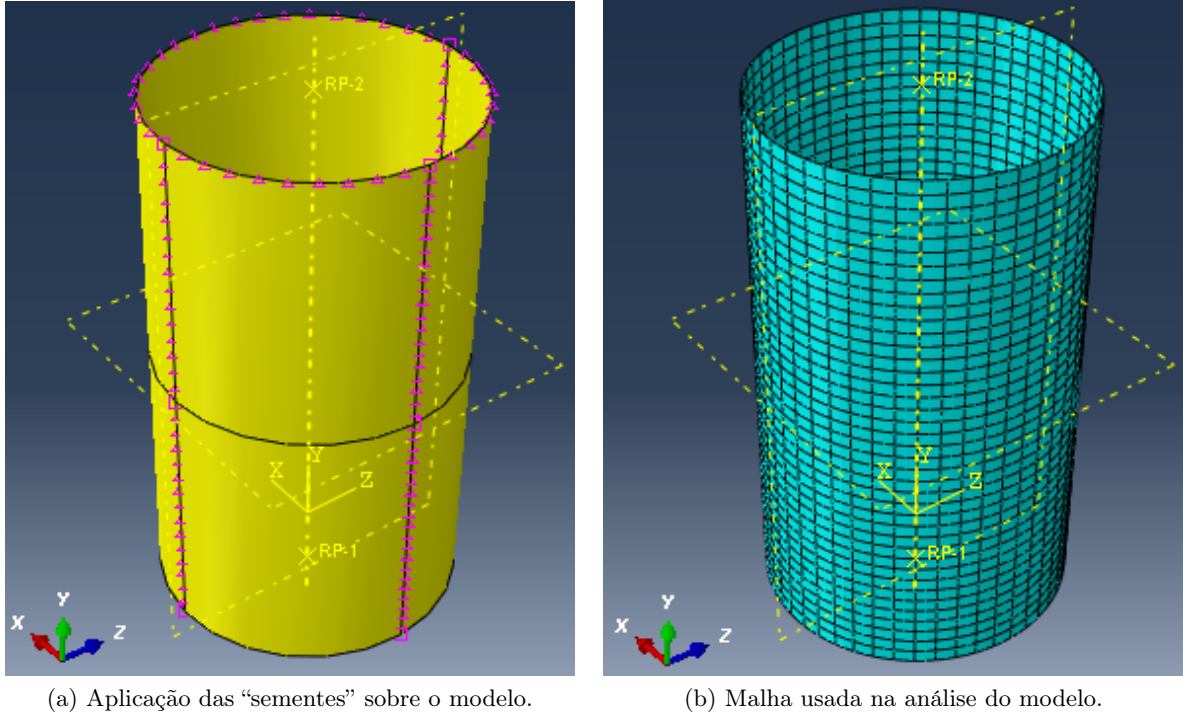


Figura 7.10: Definição da malha do tubo reto equivalente através das técnicas de *edge seeding* e *sweep meshing*.

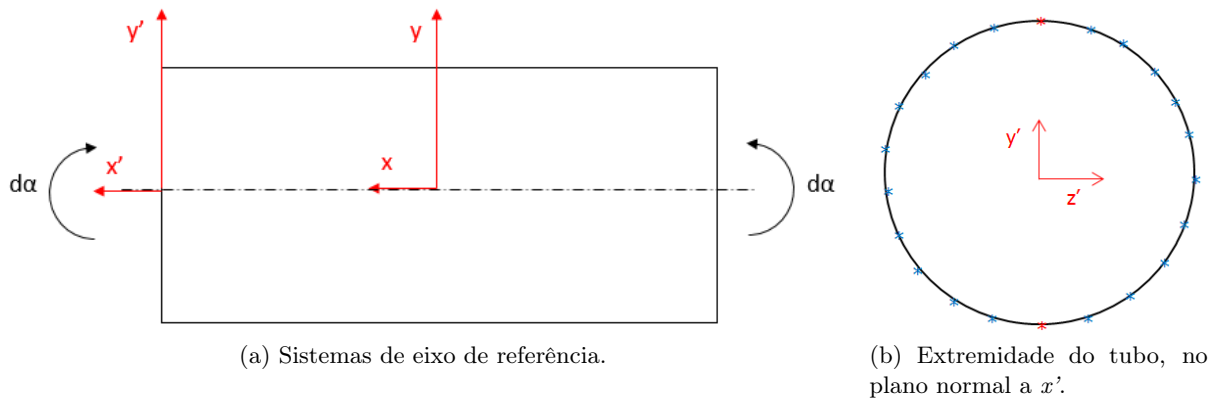


Figura 7.11: Ilustração dos sistemas de coordenadas, base para a definição das condições de fronteira e carregamento do modelo do tubo reto equivalente.

8

Análise Experimental

Após toda a análise analítica e numérica, passa-se à realização do procedimento experimental a seguir apresentado. Este é idealizado na tentativa de replicar, da forma mais próxima possível, o tipo de carregamento aplicado à curva segmentada, conforme o descrito no caso de estudo, capítulo 6.

O dito procedimento pode ser dividido em três partes. A primeira corresponde à idealização do teste a efetuar e definição das partes constituintes do espécime a testar. A segunda parte destina-se ao processo efetivo de construção do espécime. A terceira e última parte é relativa ao ensaio mecânico em si, recolção de dados e o seu tratamento.

8.1 Idealização do Ensaio Mecânico

O ensaio mecânico é idealizado tendo em conta a máquina de testes disponível e o tipo de carregamento o deslocamento passível de se obter. Uma vez que a máquina de ensaios apenas realiza carregamentos/deslocamentos na direção vertical, tem de se proceder à construção de um conjunto como o representado na figura 8.2.

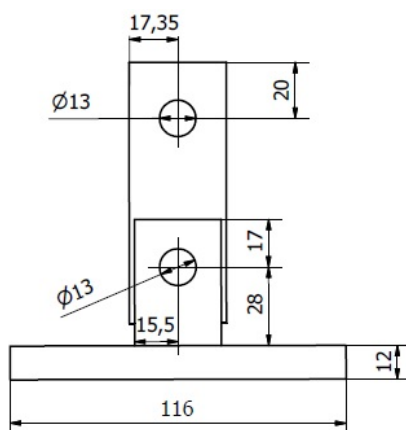


Figura 8.1: Vista lateral do conjunto de amarração.

O conjunto de amarração do tipo rótula e pino deve ser suficientemente rígido para que a transmissão de força se dê sem perdas significativas pela deformação dos dois conjuntos de amarras. A figura 8.1 mostra uma vista lateral deste conjunto, a qual se encontra simplificada

apenas para que permita observar a altura do pino e a posição vertical dos furos relativamente às extremidades do mesmo, uma vez que estas dimensões serão necessárias mais adiante. O desenho técnico do conjunto de amarração encontra-se completamente definido no anexo J.

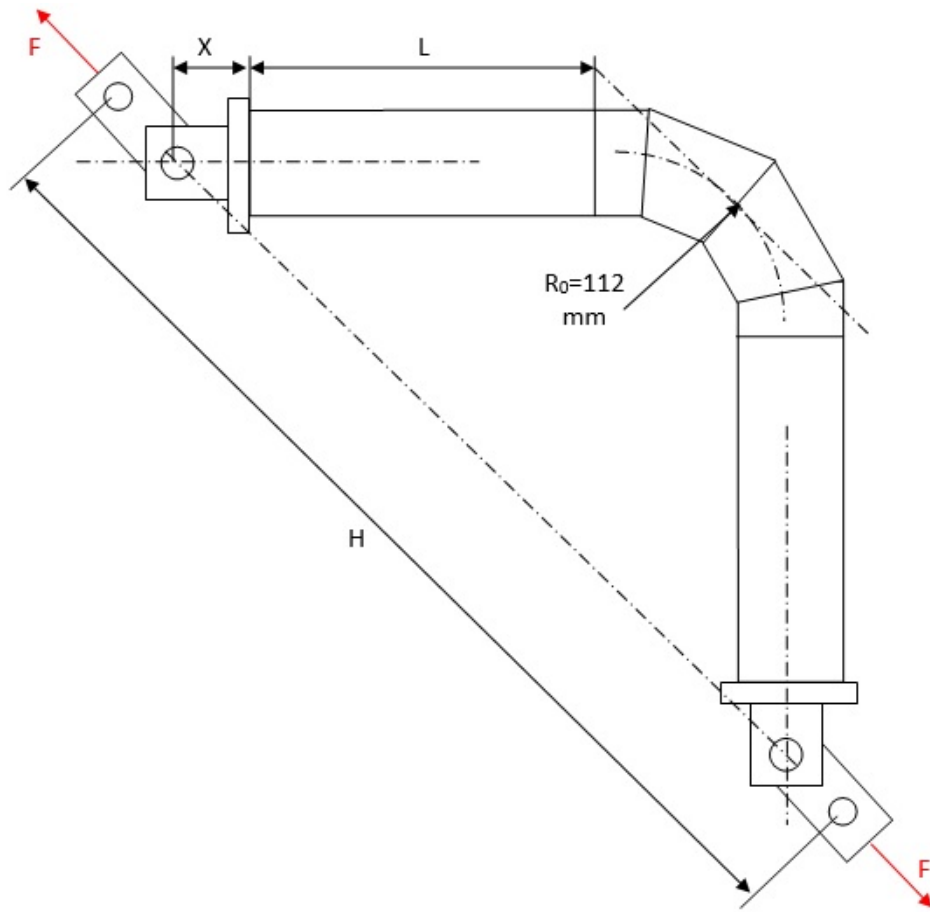


Figura 8.2: Representação do conjunto experimental a construir.

A construção do conjunto sujeito à análise experimental teve de obedecer a uma restrição dimensional, para que a sua instalação no banco de ensaios fosse possível sem quaisquer constrangimentos ou danos quer à máquina de testes quer ao espécime a ensaiar.

A restrição imposta deve-se ao facto de uma utilização segura da máquina de testes implicar a limitação da altura máxima do espécime (H) a $850mm$. No entanto, de forma a evitar qualquer influência das placas terminais na rigidez da curva, inserem-se dois tubos tangentes cuja extensão, segundo *Gresnigt* [3], não deve ser inferior ao comprimento l' , dado por:

$$l' = \frac{\pi D}{8} \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (8.1)$$

Onde D é o diâmetro do tubo e t a sua espessura, logo o comprimento mínimo dos tubos tangentes deve ser,

$$l' > \frac{\pi \cdot 101}{8} \sqrt{\frac{101}{1.5}} > 325.46mm \quad (8.2)$$

Como a altura do conjunto experimental não deve exceder os $850mm$, temos que a extensão dos tubos tangentes (L) não deve exceder,

$$2(L + X + R_0)^2 = (H - 2(93 - 40))^2 \Leftrightarrow L < \sqrt{\frac{(850 - 106)^2}{2}} - 40 - 112 < 374.1mm \quad (8.3)$$

Assim, de modo a diminuir a influência das placas rígidas terminais no comportamento mecânico da curva segmentada, mantendo a altura total abaixo do limite, define-se $L = 360mm$, determinando dimensionalmente todo o conjunto experimental.

8.2 Construção do Conjunto Para Análise Experimental

O processo de construção do espécime a testar foi alvo de um pensamento cuidado, uma vez que os cortes dos segmentos a partir de um tubo reto devem permanecer perfeitamente alinhados, de modo que os quadrantes das extremidades de cada segmento coincidam aquando da execução da soldadura dos mesmos. Desta forma, o conjunto das geratrizes dos segmentos constituintes da curva definem um só plano.

Em baixo é descrito o procedimento de construção do conjunto representado na figura 8.2.

- (a) Introduz-se o tubo no torno mecânico, apertando-o nas maxilas mais curtas pelo exterior de uma extremidade e apoiado pelo ponto na extremidade oposta;
- (b) Marca-se uma linha reta horizontal na superfície do tubo, passando levemente uma pastilha de corte ao longo do seu comprimento, tal como ilustrado na figura 8.3;



Figura 8.3: Ilustração das linhas guia criadas na superfície do tubo.

- (c) Fazendo uso das marcas de espaçamento angular indicadas na bucha de aperto, faz-se rodar o tubo de 90° e marca-se uma nova linha horizontal. Note-se que entre cada rotação é necessário recuar e avançar novamente o ponto, de modo a desbloquear o tubo. Esta ação é repetida mais duas vezes, obtendo-se um tubo com quatro linhas que servem de guia nas fases de corte e soldadura seguintes;

Todos os cortes que dão origem aos segmentos da curva foram realizados na serra de fita horizontal *Optimum*, ilustrada na figura 8.4. É durante a fase de corte que se percebe a real utilidade de todas as marcas realizadas previamente.



Figura 8.4: Serra de fita *Optimum S 300 DG Vario*.

- (d) A placa de aperto na mesa da serra é pintada com marcador vermelho, onde se marca o raio exterior do tubo ($50.5mm$) com auxílio de um paquímetro, fazendo coincidir a esta marca uma qualquer linha do tubo;
- (e) A serra é encostada no topo do tubo, a um ângulo de 15° relativamente à secção transversal do mesmo. Novamente com o auxílio do paquímetro, desloca-se a extremidade do tubo de $30mm$ da serra, medidos sobre a linha guia superior. O tubo é apertado de forma a trancar a sua posição e efetua-se o primeiro corte;

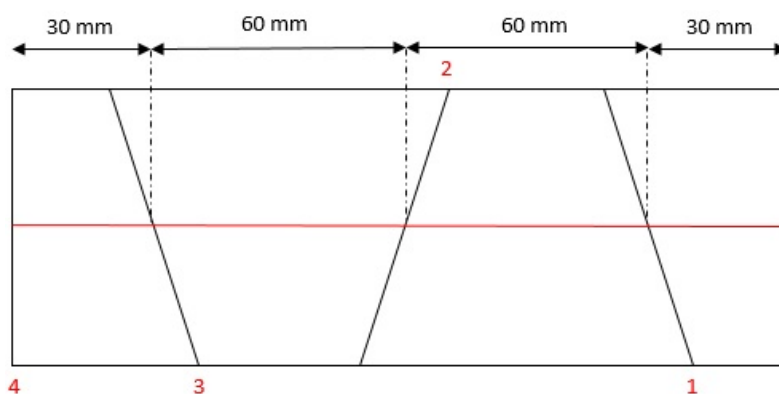
A figura 8.5 mostra a forma como o tubo foi posicionado e cortado de acordo com o descrito nas alíneas (d) e (e). Neste caso, a figura ilustra o corte de um dos segmentos do “interior” da curva.



Figura 8.5: Ilustração do posicionamento e corte do tubo na serra de fita.

Os cortes seguintes são realizados mantendo a serra na sua posição angular, pelo que entre cada corte é necessário rodar o tubo de 180° , coincidindo sempre a linha do tubo com a marca na placa de aperto da serra. Esta ação garante que os cortes em ângulo não sofram nenhuma “torção” em relação à geratriz do segmento.

A figura 8.6-a representa a sucessão de cortes realizados no tubo, onde a posição da numeração indica a linha que tem de coincidir com a marca indicada na placa da serra e as dimensões marcam o *offset* entre a extremidade do tubo e a serra de corte. A execução do corte final não implica a rotação do tubo, apenas o deslocamento deste em relação à serra de corte.



(a) Ordem e distâncias de cada corte.



(b) Corte final.

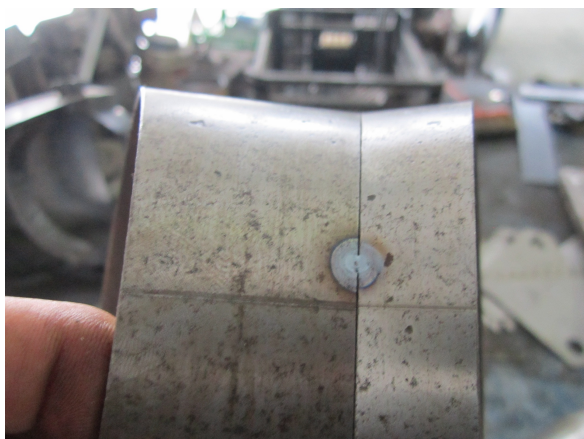


(c) Segmentos individuais.

Figura 8.6: Representação dos cortes efetuados no tubo e resultado final.

A fase seguinte implica a soldadura dos segmentos através de técnicas de soldadura *TIG*, do inglês *Tungsten Inert Gas*.

- (f) As peças são posicionadas manualmente, fazendo coincidir as linhas guia, de forma a obter um alinhamento perfeito dos segmentos, figura 8.7-a;
- (g) Os segmentos são “pingados” consecutivamente até se obter a forma da curva desejada, figura 8.7-b;
- (h) Depois da estrutura estar pingada, é executada a soldadura completa dos segmentos, obtendo-se a curva segmentada final, figura 8.7-c;



(a) Dois segmentos alinhados e pingados.



(b) Curva pingada completa.



(c) Curva segmentada final.

Figura 8.7: Ilustração das várias etapas do processo de soldadura.

- (i) Efetua-se o corte dos dois tubos tangentes e é realizada a construção das amarras, através de várias técnicas de corte, fresagem, furação e soldadura por arco elétrico, de forma a se obter o conjunto referido na secção 8.1;
- (j) Os tubos tangentes são soldados, novamente por um processo de soldadura *TIG*, usando as linhas guia como forma de alinhar os tubos com a curva. Esta ação permite a posterior orientação das amarras, cujo plano de rotação do pino deve estar perfeitamente alinhado com o plano da curva;
- (k) A soldadura dos conjuntos de amarração às extremidades dos tubos tangentes marca a ação final deste procedimento, obtendo-se assim o espécime a ensaiar na última fase do procedimento experimental.

A figura 8.8 mostra a estrutura completa e final, sobre a qual incidem os procedimentos experimentais descritos posteriormente no capítulo 8.3.

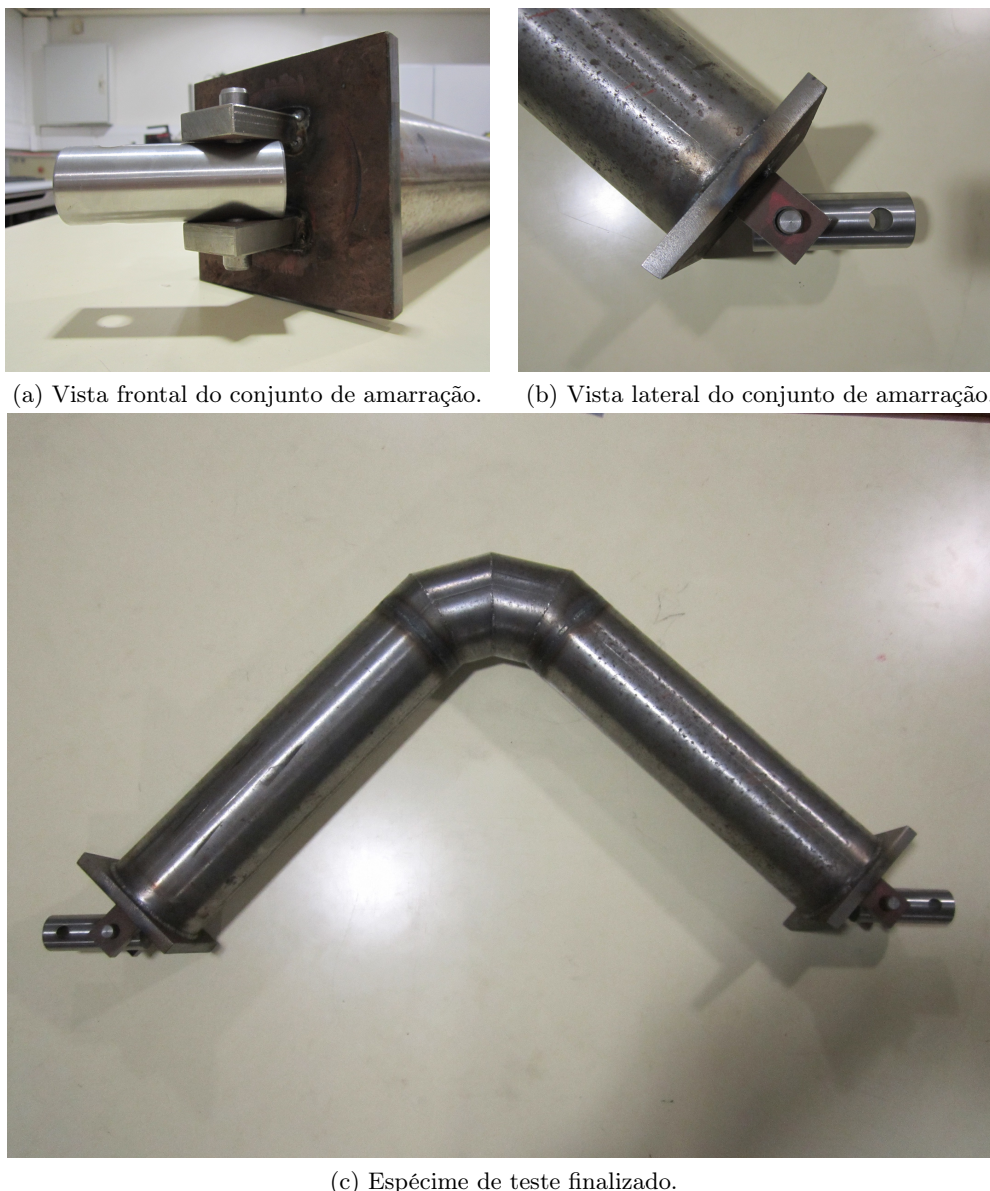


Figura 8.8: Ilustração dos vários componentes constituintes do espécime de teste, estrutura final.

8.3 Metodologia Experimental

A metodologia implementada na análise da curva segmentada é relativamente simples, quando comparada, por exemplo, com a realizada por *Gresnigt* [3] ou *Kitching e Hose* [26], descritas no capítulo 3. De facto, o procedimento usado neste estudo é bastante similar ao executado por *Neilson et al* [39], excetuando o facto de que o autor realiza um ensaio de flexão positiva no plano de uma curva segmentada simples, até ao limite plástico do material, comprimindo a estrutura no banco de ensaios.

Como descrito na apresentação do caso de estudo, capítulo 6, com a análise experimental levada a cabo pretende-se analisar o comportamento mecânico de uma curva segmentada múltipla, sujeita a flexão negativa no plano, apenas no domínio elástico do material. Este tipo de carregamento é obtido tracionando o conjunto de teste, como representado na figura 8.2.

O teste foi realizado na máquina de ensaios *Shimadzu AG-50kNG*, na qual, depois de iniciada, o espécime é introduzido, tal como se pode observar na figura 8.9.



(a) Vista frontal do arranjo de teste.



(b) Vista lateral do arranjo de teste.

Figura 8.9: Ilustrações do espécime de teste no banco de ensaio.

O espécime é acoplado ao banco de ensaio através dos pinos constituintes das amarras, que por sua vez são trancados em posição através de outros pinos de diâmetro muito inferior, como mostra a figura 8.10.



(a) Amarração superior.



(b) Amarração inferior.

Figura 8.10: Ilustrações do tipo de amarração entre o espécime de teste e o banco de ensaio.

Após uma breve verificação de que todos os elementos que são parte integrante do ensaio a realizar se encontram corretamente instalados e não existem falhas aparentes, inicia-se a elevação da mesa superior até se verificar alguma força a ser exercida no espécime, garantindo algum aperto apenas para que se dissipem as maiores folgas no sistema. No final desta ação reiniciam-se os contadores de força e deslocamento da máquina.

Neste momento, o ensaio encontra-se pronto a ser principiado, pelo que se inicia a plataforma de monitorização dos dados provenientes da célula de carga inserida na máquina de ensaios.

A monitorização é efetuada por meio de um software próprio, o qual grava todas as leituras realizadas pela célula de carga. Dá-se assim início ao ensaio mecânico da curva segmentada, tracionando o conjunto a uma velocidade $v = 0.0005\text{mm/s}$. Foram realizados três ensaios de acordo com este procedimento, cujos resultados são os apresentados na figura 8.11.

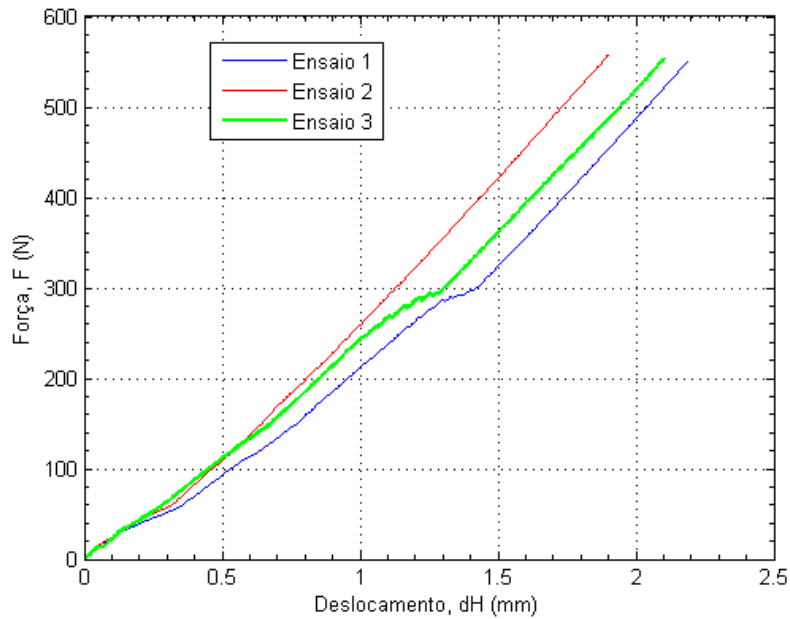


Figura 8.11: Resultados dos ensaios de flexão negativa.

Como se pode verificar, o primeiro e terceiro ensaios incorrem de algumas não linearidades até perto dos 1.5mm de deslocamento. O segundo ensaio aparentemente não apresenta não linearidades a partir dos 0.9mm de deslocamento. No entanto, até cerca dos 310N de força, todos os dados dos três ensaios são negligenciados. As referidas não linearidades devem-se a ajustes do sistema a possíveis folgas e atrito nas rótulas.

As curvas Força-Deslocamento são assim truncadas e deslocadas para a origem, resultando no conjunto de curvas sobre as quais o restante tratamento de dados incide, ver figura 8.12.

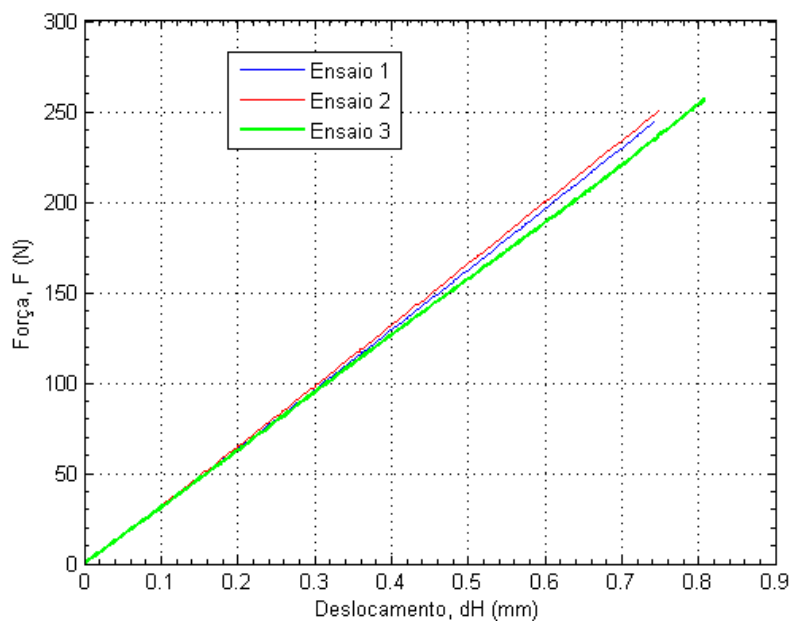


Figura 8.12: Curvas úteis sobre a relação Força-Deslocamento dos ensaios de flexão negativa.

As dimensões obtidas através dos ensaios mecânicos da curva segmentada representam a força F e o incremento pelo qual o comprimento H é aumentado (dH), tal como indicado na figura 8.13, onde r é o raio de curvatura da curva segmentada e B é a distância entre um ponto de amarração e a extremidade da curva segmentada.

De acordo com o especificado na secção 8.1, temos:

$$B = 40 + 360 = 400mm \quad (8.4)$$

O comprimento B é o braço da componente vertical da força F , desta forma, o momento responsável pela rotação da extremidade da curva segmentada é dado por:

$$M = F \sin(\alpha - d\alpha) \cdot B \quad (8.5)$$

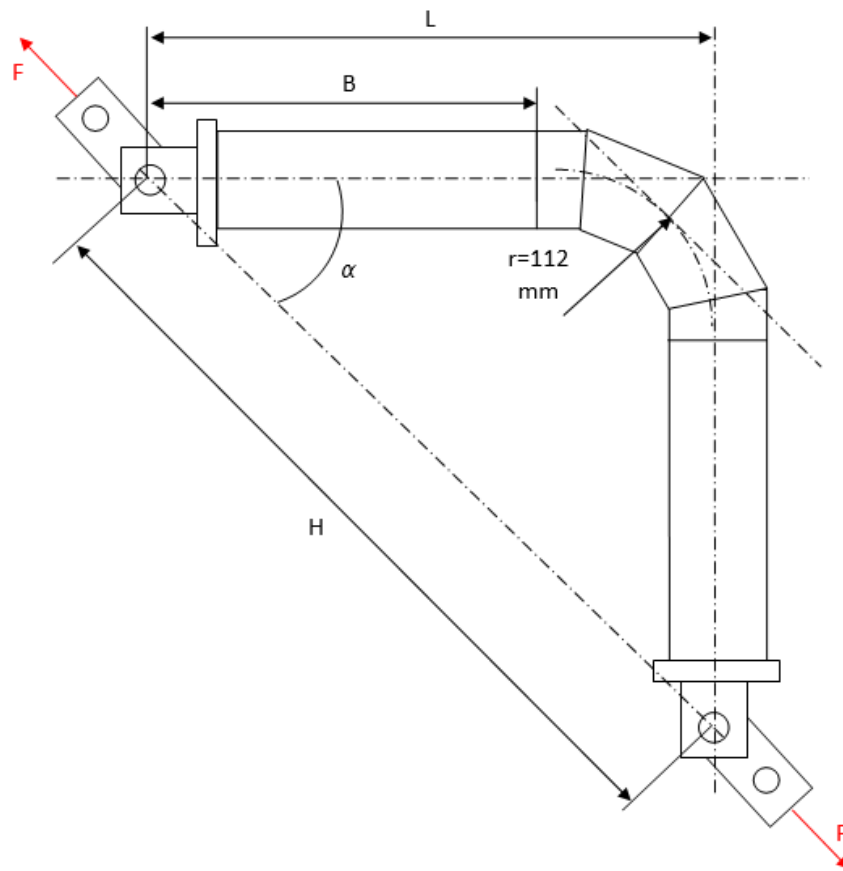


Figura 8.13: Representação da curva segmentada em estudo.

O comprimento L é obtido por:

$$L = B + r = 512mm \quad (8.6)$$

A distância entre os pontos de amarração, H , é dado por:

$$H = L\sqrt{2} = 724.1mm \quad (8.7)$$

O ângulo inicial, α , entre a linha de ação da força e uma das “pernas” do conjunto de teste é $\alpha = \pi/4rad$, sendo o deslocamento angular $d\alpha$ obtido da seguinte forma:

$$d\alpha = \alpha - \cos^{-1} \left(\frac{(H + dH)/2}{L} \right) \quad (8.8)$$

Apresentação de Resultados

Neste capítulo é realizada a apresentação de resultados. Dado que este trabalho se baseou na análise de curvas segmentadas de material metálico e compósito, de forma a aproximar o fator de flexibilidade deste tipo de componente, também a apresentação de resultados é diferenciada pelo tipo de material afeto à curva.

9.1 Curva Segmentada Metálica

9.1.1 Comparação Entre os Resultados Analíticos, Numéricos e Experimentais

Os resultados que se pretendiam atingir através da análise experimental descrita no capítulo 8 são os ilustrados no gráfico da figura 9.1, que descreve a relação momento-deslocamento angular da curva segmentada real, testada experimentalmente.

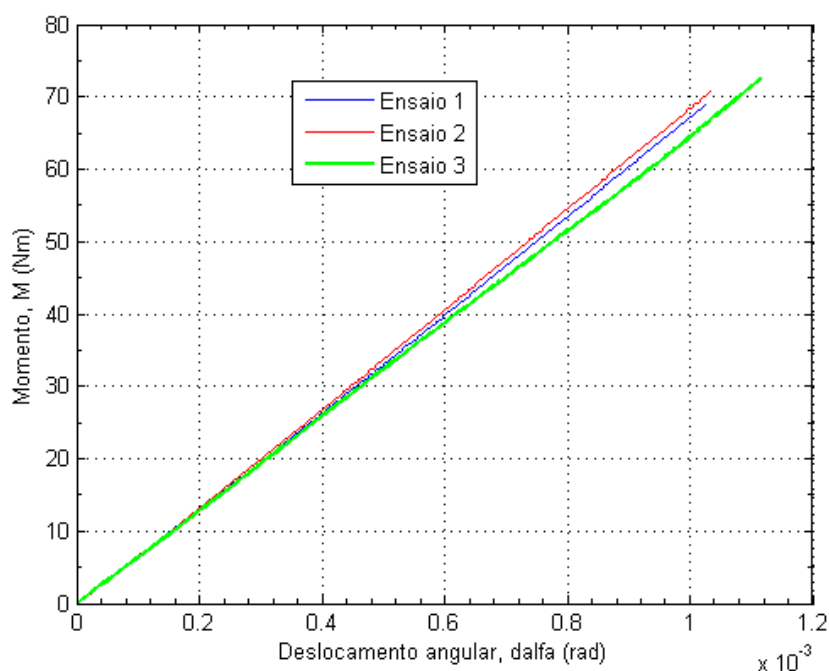


Figura 9.1: Curvas Momento-Deslocamento Angular dos ensaios de flexão negativa.

Tabela 9.1: Resultados relevantes, derivados dos ensaios de flexão negativa.

	F_{max} (N)	dH_{max} (mm)	M_{max} (Nm)	$d\alpha_{max}$ (rad)	$M_{d\alpha=10^{-3}}$ (Nm)
Ensaio 1	244.00	0.742	68.94	1.0253×10^{-3}	67.320
Ensaio 2	250.25	0.748	70.71	1.0336×10^{-3}	68.309
Ensaio 3	256.50	0.808	72.47	1.1165×10^{-3}	64.565

A tabela 9.1 mostra alguns dos resultados que se prendem com os ensaios mecânicos operados na curva segmentada metálica. De entre os dados referidos, são de especial importância os indicados na última coluna, os quais relacionam o momento necessário, M_{exp} , para que se obtenha um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.001rad$, na extremidade da curva. Este é o resultado base com o qual são comparados os dados obtidos através dos métodos analíticos e numéricos descritos ao longo desta dissertação. Assim, comparações posteriores são realizadas relativamente à média dos três ensaios experimentais efetuados, onde temos,

$$M_{exp}(d\alpha_0 = 10^{-3}) = 66.731Nm \quad (9.1)$$

Os resultados obtidos através dos modelos analítico e numérico são apresentados em baixo, figuras 9.2 e 9.3, onde se compara o comportamento previsto pelos referidos modelos em relação à energia de deformação total da curva e momento fletor de acordo com o deslocamento angular imposto à extremidade da curva segmentada. Estes resultados são representados para um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.015rad$, quinze vezes superior ao obtido experimentalmente, para que se possa observar o supradito comportamento de um modo mais geral e abrangente.

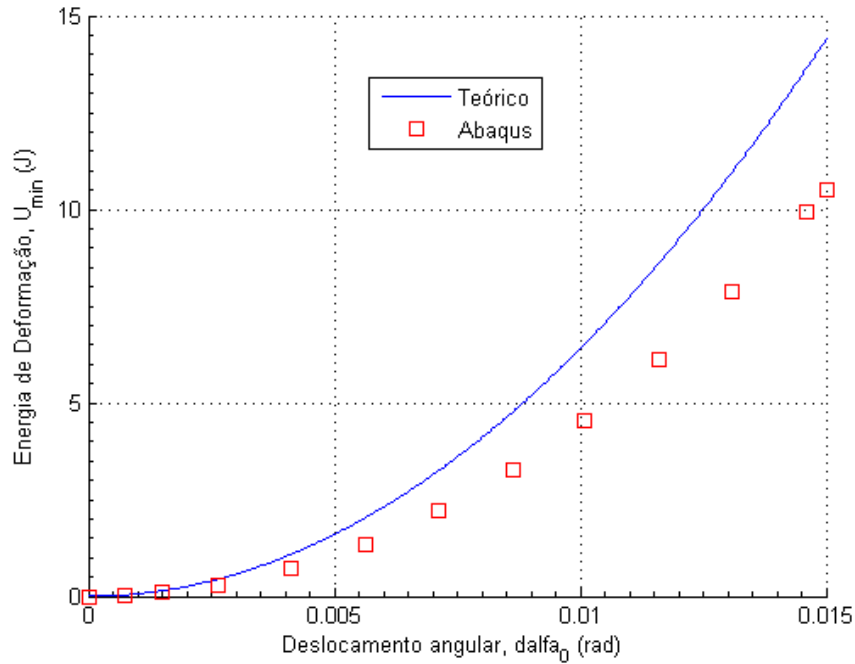


Figura 9.2: Gráfico comparativo sobre a relação Energia de Deformação-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente.

De facto, a solução obtida pela análise por elementos finitos afasta-se significativamente da solução analítica, onde o erro aumenta com o aumento do deslocamento angular até cerca de 27% para $d\alpha_0 = 0.015rad$. Esta divergência pode ser devida a uma questão numérica relacionada com o tipo de elementos utilizados na análise por elementos finitos, que não acompanha a rigidez evidenciada pela formulação analítica.

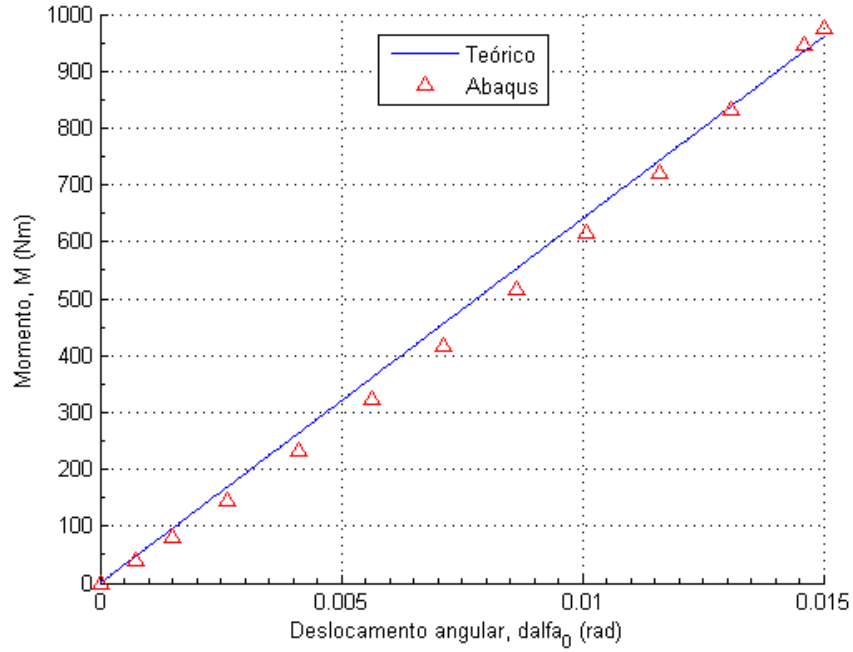


Figura 9.3: Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente

Já sobre a relação $M-d\alpha_0$, observando a figura 9.3, compreende-se que a aproximação entre os resultados numéricos e analíticos da curva segmentada são bastante razoáveis, com um erro máximo de 16% para um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.00075rad$. A relação representada na figura acima é a mesma que a obtida através do procedimento experimental, pelo que uma comparação efetiva entre todos os resultados pode ser agora realizada. Limitando o gráfico da figura 9.3 a um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.001rad$ e sobrepondo a curva $M_{exp}-d\alpha_0$ média dos três ensaios experimentais realizados, obtém-se o gráfico apresentado na figura 9.4.

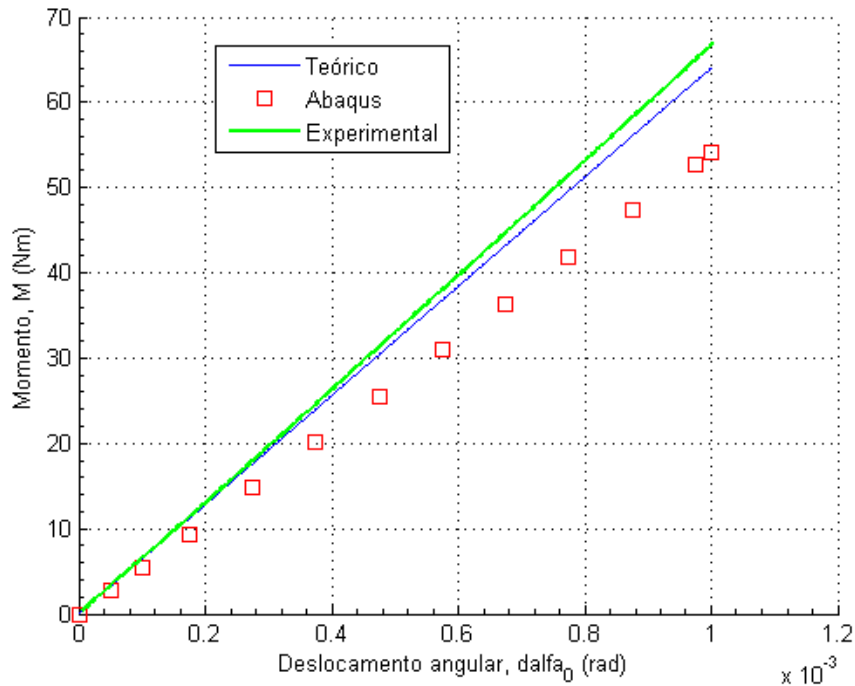


Figura 9.4: Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica, numérica e experimentalmente.

Tabela 9.2: $M(d\alpha_0 = 0.001rad)$ de acordo com as metodologias numérica, analítica e experimental.

	Teórico	<i>Abaqus</i>	Experimental
$M(d\alpha_0 = 0.001rad)$ (Nm)	64.04	54.14	66.731

Tabela 9.3: Erro relativo entre o momento fletor obtido através das metodologias numérica, analítica e experimental, para $d\alpha_0 = 0.001rad$.

	Teórico- <i>Abaqus</i>	<i>Abaqus</i> -Experimental	Teórico-Experimental
erro (%)	15.46	19.12	4.33

Os resultados comparativos entre os métodos teórico e experimental, como se depreende dos valores indicados nas tabelas 9.2 e 9.3, afetas aos dados ilustrados no gráfico da figura 9.4, são bastante bons, conseguindo-se prever com uma precisão apreciável o comportamento real da curva segmentada. Por sua vez, os resultados obtidos através da análise por elementos finitos, apesar de demonstrarem ser bastante robustos na aproximação do momento fletor, para deslocamentos angulares relativamente baixos, como os observados durante o procedimento experimental, apresentam uma precisão bastante inferior à evidenciada pelo método analítico.

De modo que seja possível a obtenção do fator de flexibilidade, é necessário calcular o momento fletor capaz de provocar o deslocamento angular $d\alpha_0$ negligenciando os módulos de ovalização da curva segmentada. Como ficou patente na secção 7.5, este caso pode ser traduzido na análise de um tubo reto equivalente, de onde se retira o momento que é necessário aplicar às suas extremidades para que estas apresentem um mesmo deslocamento angular $d\alpha_0$. Em baixo são apresentados os resultados provenientes desta análise.

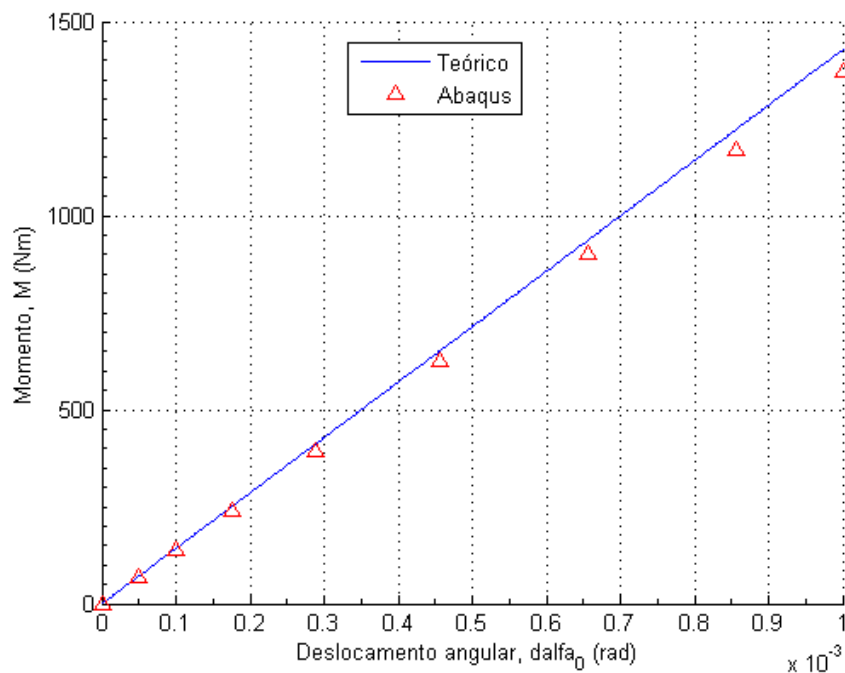


Figura 9.5: Relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica e numericamente, para o caso do tubo reto equivalente.

Tabela 9.4: Momento fletor obtido através das metodologias numérica e analítica, para $d\alpha_0 = 0.001rad$, e respetivo erro.

	Teórico	<i>Abaqus</i>
$M(d\alpha_0 = 0.001rad)$ (Nm)	1427	1370
erro (%)	4	

Como se pode comprovar, observando o gráfico da figura 9.5 e os respetivos valores indicados na tabela 9.4, os resultados obtidos através da análise por elementos finitos do tubo reto equivalente corroboram a analogia efetuada na secção 7.5 e a solução analítica dada pela expressão 4.30. Assim, para efeitos de cálculo do fator de flexibilidade segundo as metodologias apresentadas nesta dissertação, os momentos fletores relativos ao modelo do tubo reto equivalente são os seguintes:

$$M_{REqTeorico}(d\alpha_0 = 10^{-3}) = 1427Nm \quad (9.2)$$

$$M_{REqAbaqus}(d\alpha_0 = 10^{-3}) = 1370Nm \quad (9.3)$$

9.1.2 Comparação Entre os Fatores de Flexibilidade Obtidos e Códigos Existentes

Nesta secção é atingido um dos grandes objetivos desta dissertação, realizando uma comparação entre o fator de flexibilidade calculado através das metodologias desenvolvidas neste trabalho e as metodologias apresentadas no capítulo 5. A figura seguinte ilustra precisamente uma visão geral quantitativa do fator de flexibilidade previsto por cada uma destas metodologias.

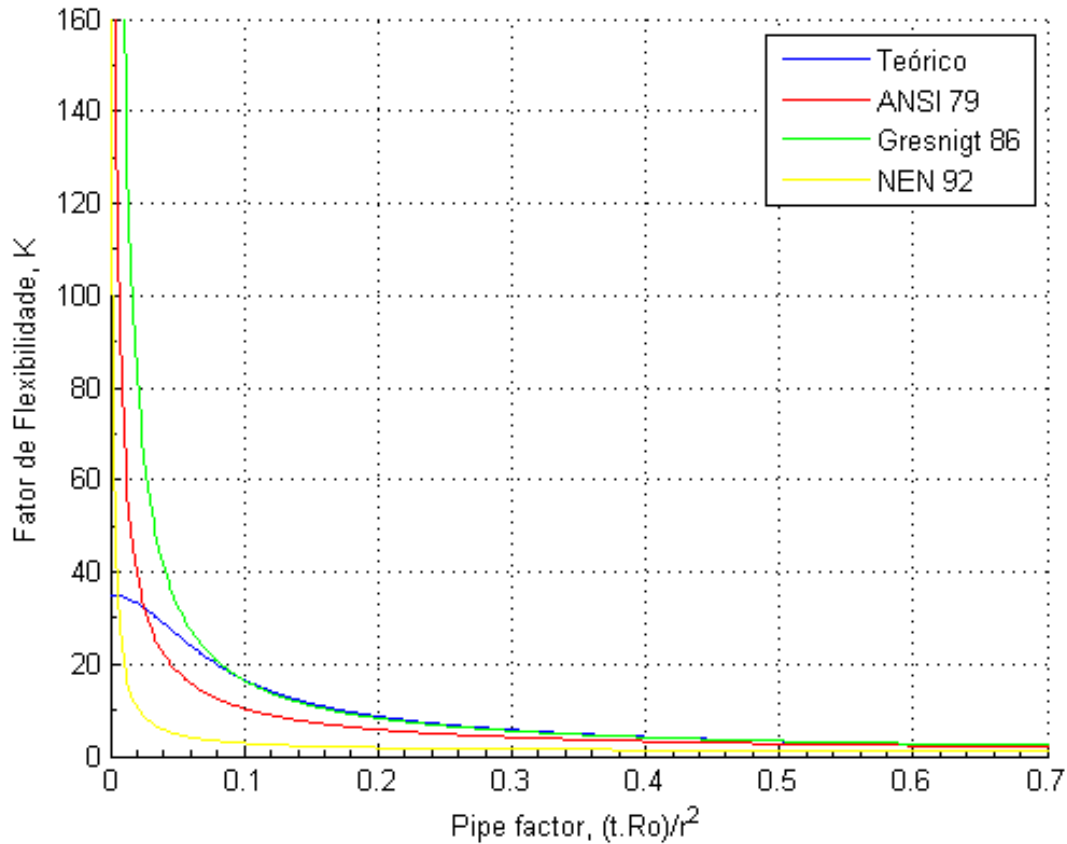


Figura 9.6: Gráfico comparativo do fator de flexibilidade em função do *pipe factor*, de acordo com várias metodologias.

A figura 9.6 mostra o fator de flexibilidade em função do *pipe factor*, λ , parâmetro geométrico dado pela expressão 4.32, onde, revendo as metodologias temos:

- Curva Teórica (azul), $K = \frac{4800\lambda^4 + 4136\lambda^2 + 105}{4800\lambda^4 + 536\lambda^2 + 3}$, expressão 4.33;
- Curva *ANSI 79* (vermelho), $K = \frac{1.52}{\lambda^{5/6}}$, expressão 5.5;
- Curva *Gresnigt 86* (verde), $K = \frac{1.65}{\lambda}$, expressão 5.8;
- Curva *NEN 92* (amarelo), $K^* = 1 + (K - 1)\sqrt{1 - \left(\frac{\gamma - \beta}{\gamma}\right)^2}$ e $\gamma = 1200\sqrt{\frac{t}{D}}$, expressões 5.9 e 5.10 respetivamente.

Observando o gráfico da figura 9.6, compreende-se que a solução desenvolvida neste trabalho não é tão conservadora quanto os códigos *ANSI/ASME B31* e *NEN 3650*, encontrando-se bastante próxima da solução apontada por *Gresnigt* até valores de λ próximos de 0.1. Note-se que apenas a solução teórica limita inferiormente o fator de flexibilidade a $K = 35$. De facto, para tubagens com um *pipe factor* relativamente baixo, as restantes metodologias, à exceção da norma *NEN 3650*, tendem a sobrestimar a flexibilidade de uma forma bastante grosseira.

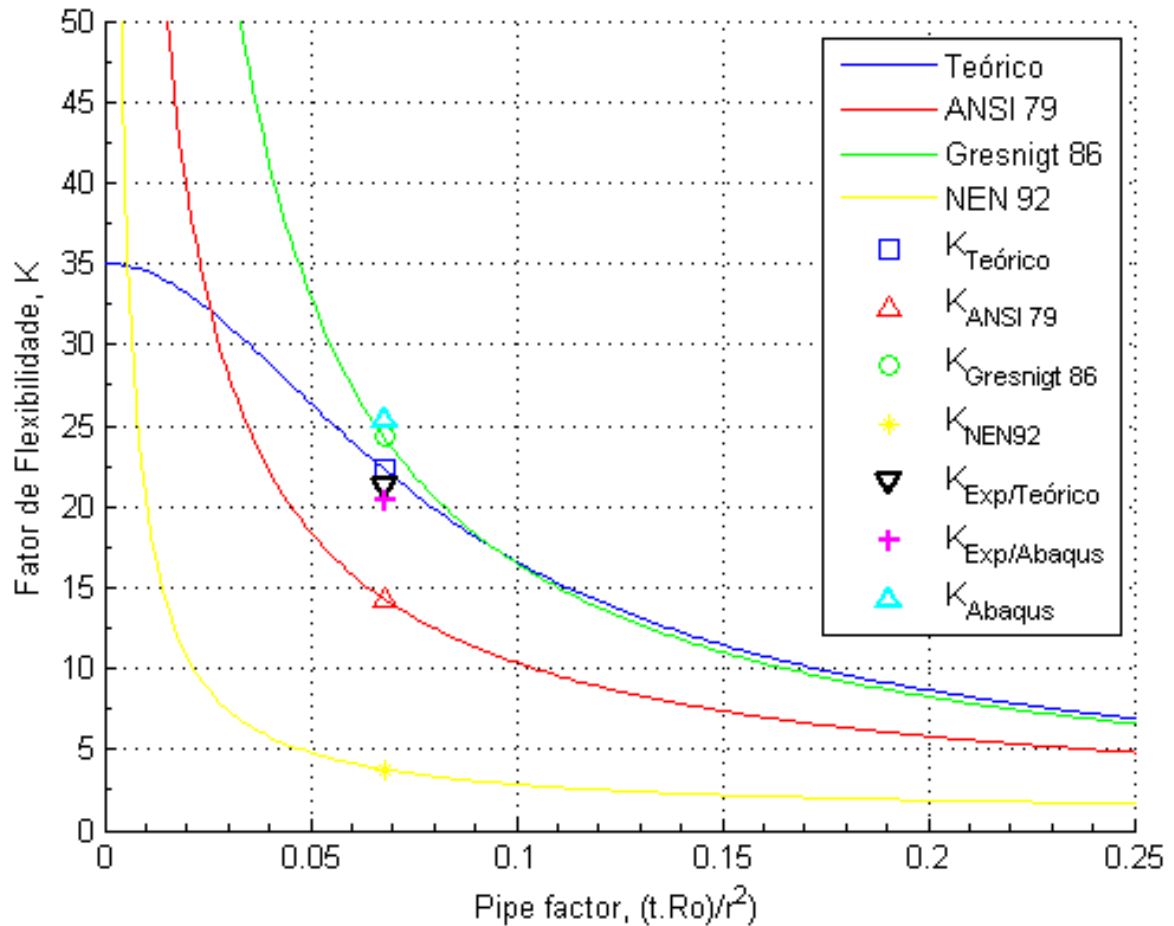


Figura 9.7: Fator de flexibilidade em função do *pipe factor*, para o caso de estudo, de acordo com várias metodologias.

O gráfico da figura 9.7 ilustra os resultados finais associados à flexibilidade da curva segmentada metálica, indicando o fator de flexibilidade previsto por cada metodologia, para o *pipe*

factor afeto à curva em estudo. A curva segmentada que serve o propósito de caso de estudo desta dissertação possui um *pipe factor* $\lambda = 0.679$.

Assim, os fatores de flexibilidade assinalados na figura 9.7, sobre as linhas representadas, são obtidos, substituindo o referido *pipe factor* nas respectivas expressões indicadas acima. Os restantes pontos representam os fatores de flexibilidade, K , obtidos da seguinte forma:

- Fator de flexibilidade experimental obtido por comparação com o tubo reto equivalente teórico (preto), $K_{Exp/Teorico} = \frac{M_{REqTeorico}}{M_{exp}}$;
- Fator de flexibilidade experimental calculado por comparação com o tubo reto equivalente obtido por simulação por elementos finitos (magenta), $K_{Exp/Abaqus} = \frac{M_{REqAbaqus}}{M_{exp}}$;
- Fator de flexibilidade dado apenas com base nos resultados obtidos por simulação numérica (azul claro), $K_{Abaqus} = \frac{M_{REqAbaqus}}{M_{Abaqus}}$.

Note-se que o valor M_{Abaqus} é o valor indicado na tabela 9.2, na coluna *Abaqus*. Os valores de K alcançados ao longo desta análise são os indicados na tabela 9.5.

Tabela 9.5: Fatores de flexibilidade resultantes da análise da curva segmentada metálica.

K_{ANSI79}	$K_{Gresnigt86}$	K_{NEN92}	K_{Abaqus}	$K_{Teorico}$	$K_{Exp/Teorico}$	$K_{Exp/Abaqus}$
14.31	24.32	3.78	25.31	22.29	21.32	20.47

Como seria de esperar, o fator de flexibilidade experimental está mais próximo do obtido através da solução teórica do que aquele obtido por meio da simulação numérica, uma vez que esta não conseguiu prever tão precisamente o comportamento mecânico da curva, como através da metodologia analítica, facto evidenciado na figura 9.4. Por sua vez, no caso da análise do tubo reto equivalente, as soluções alcançadas pelas metodologias apresentadas revelaram ser bastante próximas, pelo que não se deve desconsiderar qualquer um dos valores de K_{Exp} . Por conseguinte, A tabela seguinte mostra o erro evidenciado por cada uma das metodologias em relação ao fator de flexibilidade experimental.

Tabela 9.6: Erros relativos dos fatores de flexibilidade resultantes da análise da curva segmentada metálica.

ERRO (%)	K_{ANSI79}	$K_{Gresnigt86}$	K_{NEN92}	K_{Abaqus}	$K_{Teorico}$
$K_{Exp/Abaqus}$	30.1	18.8	81.5	23.6	8.9
$K_{Exp/Teorico}$	32.9	14.1	82.3	18.7	4.5

Deste modo, se verifica que as metodologias desenvolvidas no decorrer desta dissertação apresentam uma solução para o fator de flexibilidade de curvas segmentadas melhor ajustada ao comportamento real da mesma.

Como nota, deve-se apontar que o fator de flexibilidade também poderia ser dado pela razão entre a energia de deformação acumulada num tubo reto equivalente, para um dado $d\alpha_0$, e a energia de deformação da curva segmentada para o mesmo deslocamento angular. No entanto percebe-se que esta não é a melhor opção, pois o erro obtido neste cálculo seria mais elevado que o dado para o fator de flexibilidade obtido com base nos momentos fletores.

9.2 Curva Segmentada Compósita

No processo de análise da flexibilidade de curvas segmentadas ao longo desta dissertação, não houve lugar a uma execução experimental usando um elemento tubular compósito, pelo que a avaliação do fator de flexibilidade de curvas segmentadas compósitas, presente nesta secção, é realizada recorrendo apenas às metodologias numérica e analítica.

9.2.1 Comparação Entre os Resultados Analíticos e Numéricos

Os resultados obtidos através dos modelos numérico e analítico descritos nos capítulos 4 e 7, para o caso de uma curva segmentada compósita sujeita a flexão negativa no plano, são apresentados através dos gráficos das figuras 9.8 e 9.9, onde se pode comparar o comportamento mecânico previsto pelos referidos modelos.

Tal como no caso da curva metálica e de forma a se poder observar o comportamento da curva de um modo geral, estes resultados são representados para um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.015rad$.

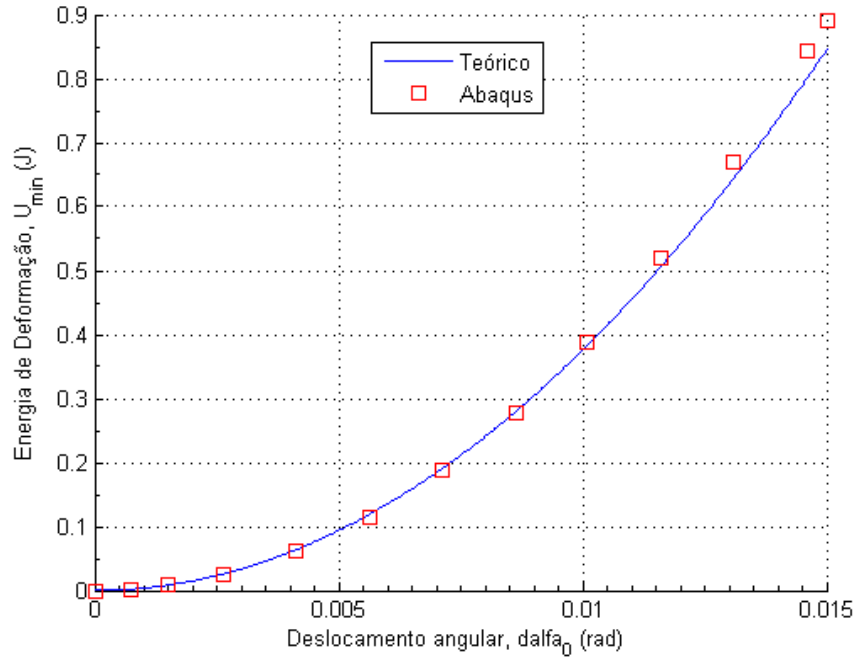


Figura 9.8: Gráfico comparativo sobre a relação Energia de Deformação-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente.

As soluções obtidas no cálculo da energia de deformação, quer através da metodologia analítica (*Teórico*), quer através da simulação numérica (*Abaqus*), apresentam uma correspondência excelente, verificando-se uma pequena divergência apenas para valores de $d\alpha_0 > 0.012rad$. O erro máximo obtido nesta análise é de apenas 5.3%, para $d\alpha_0 = 0.015rad$, o que comprova a excelente concordância entre os referidos modelos.

Já sobre a relação $M-d\alpha_0$, observando a figura 9.9, compreende-se que a aproximação entre os resultados numéricos e analíticos da curva segmentada compósita são bastante bons até deslocamentos angulares na ordem de $d\alpha_0 = 0.007rad$, a partir de onde se verifica uma divergência crescente com o aumento do deslocamento angular. O erro máximo é de 18.3% para um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.015rad$.

De facto, para deslocamentos angulares mais próximos dos evidenciados nos ensaios experimentais da curva metálica, ambas as soluções evidenciam uma proximidade quase perfeita, como se pode comprovar através do gráfico da figura 9.10.

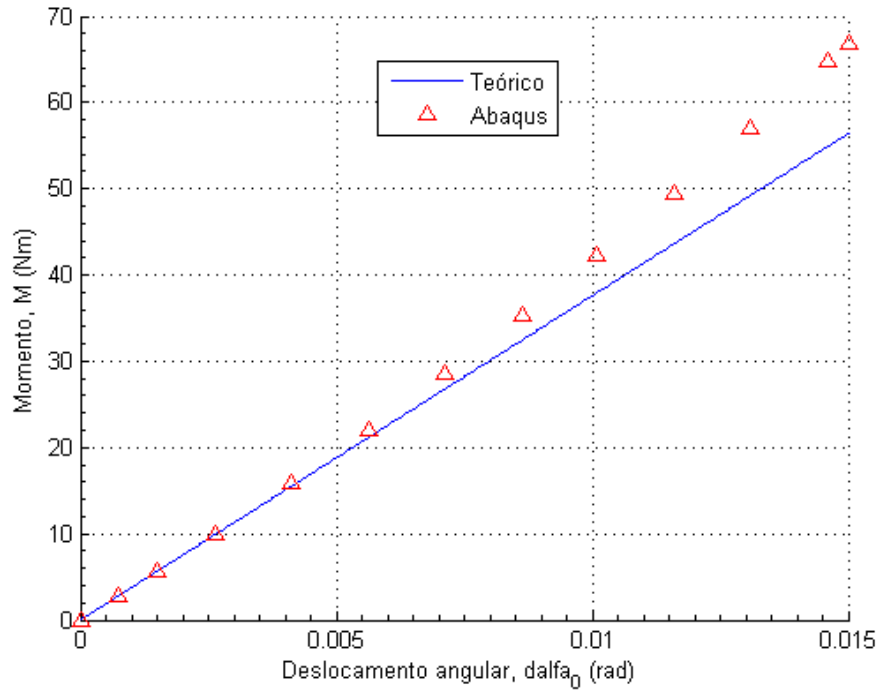


Figura 9.9: Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.015rad$, obtidos analítica e numericamente.

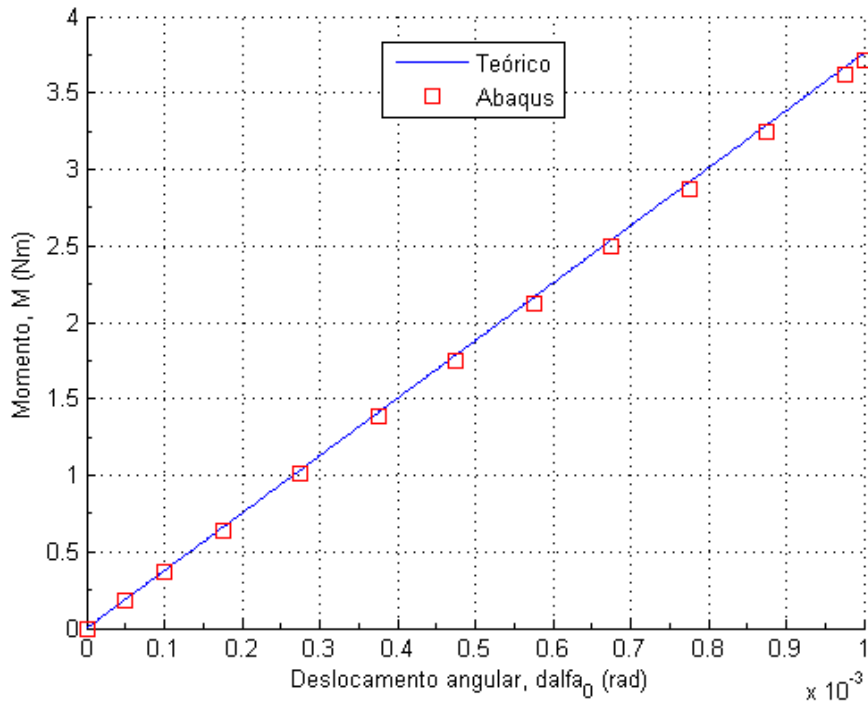


Figura 9.10: Gráfico comparativo sobre a relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica e numericamente.

Da mesma forma que para o caso da curva metálica, o cálculo do fator de flexibilidade é realizado com base nos momentos fletores e não na energia de deformação, para um deslocamento angular $d\alpha_0 = 0.001rad$. Neste caso, os valores considerados no supradito cálculo são os apresentados na tabela 9.7.

Tabela 9.7: Momento fletor obtido através das metodologias numérica e analítica, para $d\alpha_0 = 0.001rad$, e respetivo erro.

	Teórico	<i>Abaqus</i>
$M_{Comp}(d\alpha_0 = 0.001rad)$ (Nm)	3.761	3.709
erro (%)	1.4	

A seguir são apresentados os resultados afetos à analogia do tubo reto equivalente para o caso compósito, onde também se observa uma boa concordância entre as metodologias numérica e analítica.

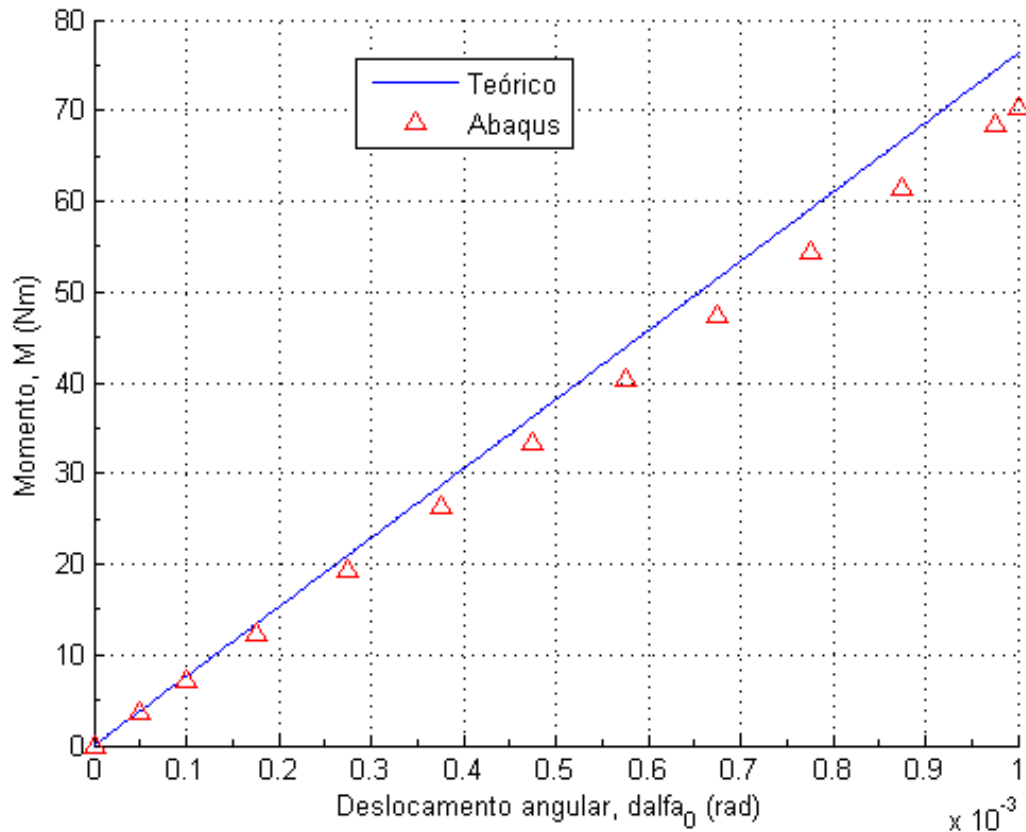


Figura 9.11: Relação Momento-deslocamento angular, até $d\alpha_0 = 0.001rad$, obtidos analítica e numericamente, para o caso do tubo reto equivalente.

Tabela 9.8: Momento fletor obtido através das metodologias numérica e analítica, para $d\alpha_0 = 0.001rad$, para o caso do tubo reto equivalente.

	Teórico	<i>Abaqus</i>
$M_{CompREQ}(d\alpha_0 = 0.001rad)$ (Nm)	76.26	70.21
erro (%)	7.9	

Os modelos numérico e analítico desenvolvidos para o caso de uma curva segmentada compósito apresentam uma concordância muito boa, pelo que se pode constatar que a metodologia analítica desenvolvida para o caso de curvas compósitas se prevê de grande utilidade na previsão do fator de flexibilidade de elementos deste tipo.

9.2.2 Comparação Entre os Fatores de Flexibilidade Obtidos

Nesta secção são apresentados os resultados relativos ao fator de flexibilidade da curva compósita tomada como caso de estudo, comparando-os com os obtidos na secção 9.1.2 para a curva de material metálico. Com a figura 9.12 pretende-se comparar a forma como o fator de flexibilidade varia em função do *pipe factor* para os casos de curvas segmentadas metálicas e compósitas, sendo que, no caso compósito, a curva representada é obtida através da metodologia descrita na secção 4.3, para o caso de estudo apresentado nesta dissertação. No caso da curva compósita, deve-se reter que o ângulo de enrolamento filamentar considerado é $\phi = 55^\circ$.

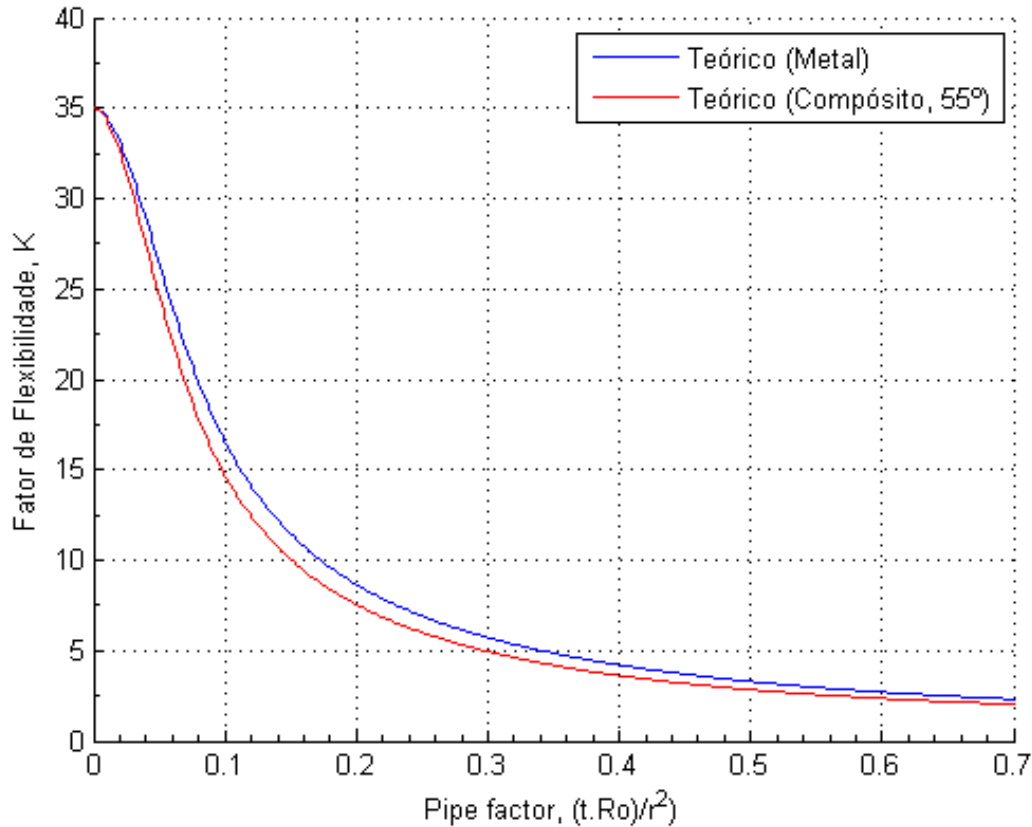


Figura 9.12: Gráfico comparativo dos fatores de flexibilidade da curva metálica e compósita, em função do *pipe factor*, obtidos através das metodologias analíticas respetivas.

Na figura anterior, a curva a azul é a mesma apresentada na secção 9.1.2 para a curva metálica e a curva a vermelho é a obtida através da expressão 4.49. Como se pode observar, as curvas encontram-se bastante próximas uma da outra, mas este facto é apenas uma coincidência, visto que o fator de flexibilidade de curvas compósitas não depende apenas de parâmetros geométricos, como para o caso de curvas metálicas.

De facto, a flexibilidade K varia de forma considerável com o ângulo de enrolamento filamentar. A figura 9.13 mostra o modo como estas duas grandezas se relacionam, onde o ângulo de enrolamento dita a direção das fibras de vidro em relação à geratriz da curva segmentada. Entre os 10° e os 80° a relação é quase linear, ao passo que pequenas alterações de ϕ perto dos valores extremos causam variações cada vez menos significativas no fator de flexibilidade. Tal é explicado pela fraca transferência de propriedades mecânicas, entre as direções longitudinal e tangencial, quando as fibras se encontram orientadas a ângulos na ordem dos $\pm 5^\circ$.

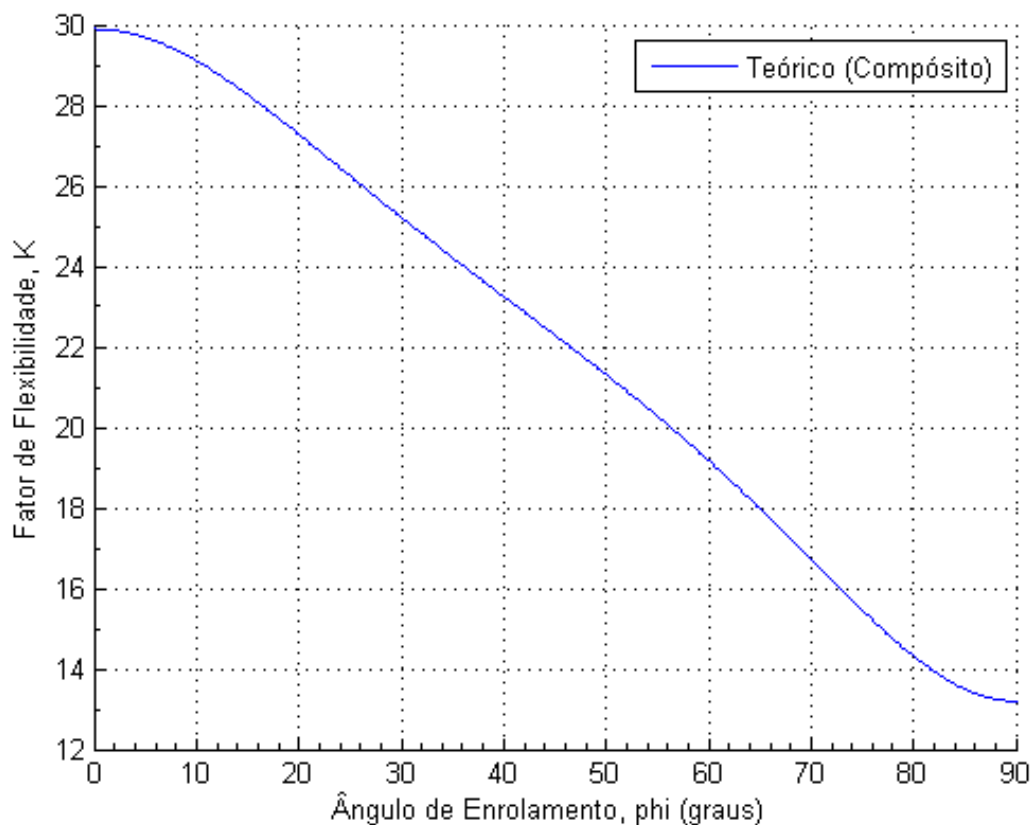


Figura 9.13: Relação $K - \phi$, obtida através do modelo analítico composto.

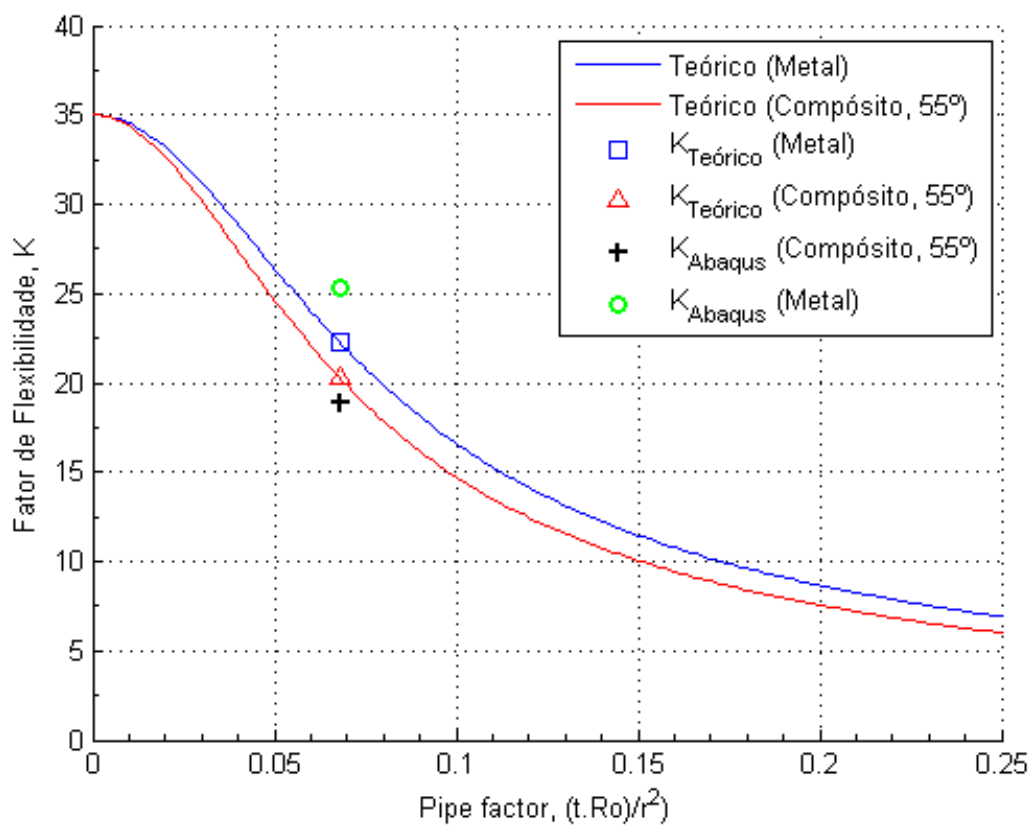


Figura 9.14: Gráfico comparativo entre os fatores de flexibilidade da curva metálica e compósita para o caso de estudo.

O gráfico da figura 9.14 mostra os resultados finais quanto à flexibilidade da curva segmentada compósita, indicando os valores de K previstos pelas metodologias numérica e analítica para os valores de λ e ϕ afetos à curva compósita em estudo. Na referida figura, o fator de flexibilidade obtido com base nos momentos calculados por meio da análise por elementos finitos, é dado por:

$$K_{CompAbaqus} = \frac{M_{CompREqAbaqus}}{M_{CompAbaqus}} \quad (9.4)$$

Assim, os fatores de flexibilidade da curva segmentada compósita, previstos pelos modelos numérico e analítico respectivos, são os apresentados na tabela 9.9.

Tabela 9.9: Fatores de flexibilidade resultantes da análise da curva segmentada compósita.

	Teórico	<i>Abaqus</i>
K_{Comp}	20.28	18.93
erro (%)		6.7

Como se pode constatar, os modelos desenvolvidos para o cálculo do fator de flexibilidade de curvas segmentadas compósitas revelam uma concordância bastante boa, evidenciada pelo erro reduzido entre as duas soluções. Deste modo, considera-se validada a expressão desenvolvida ao longo desta dissertação, relativa ao fator de flexibilidade de curvas segmentadas compósitas, definida por:

$$K = \frac{4800E_{\theta}^2\lambda^4 + 4136E_{\theta}E_z\lambda^2 + 105E_z^2}{4800E_{\theta}^2\lambda^4 + 536E_{\theta}E_z\lambda^2 + 3E_z^2}$$

10

Conclusões e Trabalhos Futuros

10.1 Conclusões

O presente trabalho foi dedicado ao desenvolvimento de metodologias de cálculo analítico e previsão do fator de flexibilidade de curvas segmentadas compósitas e metálicas. Para o efeito, foi realizada uma análise tripartida, partindo inicialmente da definição dos modelos analítico e numérico, por via do uso do *software Matlab 2013a* e *Abaqus CAE 6.10* respetivamente, seguindo-se a execução de um procedimento experimental para o caso de flexão negativa no plano, na tentativa atingir a sua validação.

Primeiramente, realizou-se o desenvolvimento da metodologia analítica de cálculo do fator de flexibilidade para o caso de uma curva segmentada metálica, através de noções energéticas estudadas por *von Karman*, para o caso de curvas lisas, e adaptadas por *Kitching* à análise de elementos deste tipo. A solução obtida é em tudo semelhante à obtida pelo referido autor, destacando-se pela precisão acrescida devido ao uso de três termos de aproximação das séries de *Fourier* à ovalização da secção transversal da curva, em vez de apenas um termo.

Em seguida, desenvolveu-se a metodologia de cálculo analítico do fator de flexibilidade para o caso de uma curva segmentada compósita, partindo das mesmas noções e pressupostos do caso metálico e introduzindo a componente ortotrópica deste tipo de material. A solução descrita permite o cálculo do fator de flexibilidade de curvas segmentadas compósitas, construídas a partir de troços tubulares retos obtidos apenas por enrolamento filamentar, uma vez que este tipo de construção produz tubagem cujas propriedades elásticas não se alteram de camada para camada, dado a sequência de empilhamento ser do tipo $[(\pm\phi)_n]$. No entanto, esta limitação pode ser facilmente ultrapassada, para casos de sequências de empilhamento com duas ou mais orientações distintas, avaliando a energia de deformação camada a camada, conforme as constantes elásticas nas direções tangencial e axial de cada uma, e calculando o somatório das contribuições energéticas das mesmas.

Na segunda fase deste estudo foi criado o modelo numérico da curva segmentada. Inicialmente e durante a fase de desenvolvimento deste estudo, a avaliação das metodologias numérica e analítica foram realizadas em paralelo, baseando-se numa curva segmentada de parâmetros geométricos aleatórios, de modo a se obter um modelo por elementos finitos de forma evolutiva, que fosse capaz de replicar o comportamento mecânico real da curva, da forma mais fiel possível. O processo de elaboração do modelo de simulação numérica constituiu uma fase algo demorada deste estudo, conhecendo alguns avanços e recuos até se obter o modelo descrito nesta dissertação. A boa concordância entre os resultados dos modelos analítico e por elementos finitos,

da curva segmentada idealizada, marcou a passagem à terceira e última fase deste estudo, o procedimento experimental.

Do procedimento experimental constou a execução dos ensaios mecânicos, assim como a elaboração e construção do espécime de teste, pelo que esta fase se revelou de facto uma experiência enriquecedora, englobando várias áreas do domínio da engenharia. Apesar de parecer algo complexo, todo este processo foi realizado sem quaisquer sobressaltos, dado o pensamento cuidado e atenção aos detalhes, na tentativa de se obter um conjunto de teste tão perfeito quanto possível.

Os resultados experimentais obtidos foram muito bons, conseguindo capturar o comportamento mecânico da curva segmentada de modo preciso, facto essencial para uma correta comparação e avaliação dos modelos numéricos e analíticos desenvolvidos para o caso da curva metálica. Neste caso, o modelo analítico conseguiu prever o momento necessário à rotação das extremidades da curva de $d\alpha_0 = 0.001rad$ com um erro de apenas 4.33%. Já o modelo numérico não produziu um resultado tão satisfatório, revelando um erro de 19.12% para a mesma rotação, no entanto, a aproximação ao comportamento mecânico da curva é bastante boa, como se comprova pela figura 9.3, onde o erro diminui para valores crescentes de $d\alpha_0$, situando-se abaixo dos 10% a partir de ângulos $d\alpha_0 > 0.005rad$. A analogia do tubo reto equivalente provou ser acertada, e o modelo numérico relativo ao mesmo evidenciou uma concordância excelente quando confrontado com a solução analítica, com um erro máximo de 4%. Assim, considera-se válido o modelo numérico da curva segmentada metálica em toda a sua dimensão, ou seja, desde a definição do material até à geometria da curva, e principalmente em relação às condições de fronteira impostas, quanto à sua habilidade de prever o comportamento mecânico de uma curva segmentada.

Apesar de tudo, quando a questão é o fator de flexibilidade de uma curva segmentada metálica, a metodologia teórica é mais precisa, revelando uma melhoria bastante significativa em relação a outras metodologias e normas internacionais, em especial quando comparada com o código *ANSI B31.8/B31.4*, visto este ser porventura o código mais relevante no dimensionamento de grandes instalações de tubagens e *pipelines* metálicas. Neste caso, a solução apresentada nesta dissertação representa uma melhoria em mais de 25% em relação à definida pela dita norma. Neste capítulo, conclui-se que a capacidade de deformação de curvas segmentadas metálicas é muito maior que a prevista pela teoria de vigas, cerca de 20 vezes superior.

Em relação às metodologias apresentadas para o caso de curvas segmentadas compósitas, é de referir que os resultados foram ainda melhores, dada a proximidade entre o comportamento previsto por ambos os modelos, numérico e analítico. De modo contrário ao apresentado para o caso de uma curva metálica, o modelo numérico para o caso compósito produziu resultados excelentes quanto à previsão da resposta mecânica da curva para rotações $d\alpha_0 < 0.0075rad$, valores a partir dos quais a solução começa a divergir. Neste caso, para uma rotação igual à atingida no caso da curva metálica, $d\alpha_0 = 0.001rad$, o erro máximo foi de apenas 1.4%. Da análise do tubo reto equivalente compósito surgiu um resultado também ele muito positivo, uma vez que o erro máximo alcançado foi de 7.9%. Desta forma se percebe o erro reduzido entre as metodologias numérica e analítica, em relação ao fator de flexibilidade de uma curva segmentada compósita, de cerca de 6.7%.

O fator de flexibilidade da curva compósita, obtido por meio dos modelos desenvolvidos, encontra-se entre os 19 e 20, pelo que se pode concluir que este tipo de elementos, em especial os fabricados por enrolamento filamentar de fibra de vidro, é capaz de rivalizar com os seus homólogos de material metálico com a mesma geometria, mas com todas as vantagens que advêm do emprego deste tipo de material, como o peso reduzido e resistência à corrosão. Contudo, deve-se ter sempre em conta a influência do ângulo de enrolamento, pois este é responsável pela determinação das constantes elásticas segundo as direções tangencial e axial, que por sua vez influenciam grandemente o fator de flexibilidade. O dimensionamento de instalações de tubagens compósitas quanto à flexibilidade tem portanto este fator de complexidade acrescida, uma vez que a mesma não depende apenas de parâmetros geométricos como no caso de curvas segmentadas metálicas.

Deste modo, dada a boa concordância entre os resultados experimentais, numéricos e analíticos, são validadas as metodologias analíticas e numéricas desenvolvidas, quanto à sua capacidade de prever adequadamente o comportamento mecânico, no domínio elástico, assim como o fator de flexibilidade de curvas segmentadas. O modelo apresentado para curvas segmentadas em material metálico, constitui uma melhoria em relação a algumas das soluções existentes mais importantes. Contudo, é em curvas de material compósito que os modelos apresentados nesta dissertação encontram possivelmente a sua maior utilidade e relevância.

10.2 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros de investigação nesta área e/ou derivados dos estudos apresentados nesta dissertação podem incluir:

- Dado que a maior lacuna deste estudo é a não realização de ensaios mecânicos de curvas segmentadas compósitas, a sua construção e execução experimental teria enorme interesse, não só na complementação à validação dos modelos aqui apresentados através da comparação com dados reais, mas também na aprendizagem e conhecimento sobre os processos de ligação entre os segmentos da curva e de que forma estes influenciam a flexibilidade destes elementos tubulares;
- Realização de ensaios experimentais em curvas segmentadas metálicas e compósitas com *pipe factors* distintos do da tubagem usada neste estudo, de forma a aferir a capacidade de previsão das metodologias numérica e analítica descritas, sobre o comportamento mecânico de estruturas deste tipo com diferentes dimensões características. Assim como a realização de ensaios mecânicos em curvas segmentadas compósitas com diferentes ângulos de enrolamento, ϕ ;
- No decorrer deste trabalho é feita referência à ovalização da secção transversal da curva, sem que esta tenha sido medida e avaliada, quer durante o procedimento experimental, quer durante a análise por elementos finitos, pelo que a inclusão desta variável em futuros trabalhos pode ser importante para uma avaliação do desempenho dos modelos numéricos;
- Execução de trabalhos similares ao aqui descrito, mas com condições de carregamento distintas, como flexão positiva no plano da curva e flexão fora do plano da curva. Além disso, a inclusão do efeito da pressão interna sobre o fator de flexibilidade, assim como o próprio comportamento mecânico da curva segmentada, poderia representar o elevar destas metodologias a um patamar superior de utilidade, principalmente para o caso de curvas segmentadas compósitas;
- Estudos no domínio plástico de curvas segmentadas compósitas, sobre os modos de falha destes componentes, consoante o tipo de carregamento e método de construção, representam imensas possibilidades de pesquisa nesta área;
- Como ficou patente neste trabalho, existem vários métodos de produção de curvas de material compósito, que empregam trajetórias complexas das fibras sobre a sua geometria, como no caso dos entrançados *3D*. A flexibilidade de elementos tubulares curvos não pode, nestes casos, ser prevista pelos métodos descritos neste trabalho, carecendo portanto de uma metodologia mais complexa.

Bibliografia

- [1] S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger. *Theory of Plates and Shells*. McGraw-Hill Book Company, Inc, 1987.
- [2] Th. von Karman. *Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleichsrohre*. Z. Ver. Deutsch. Ing., 55, 1911.
- [3] Gresnigt A. M. Elastic and plastic design of mitred bends. *Proceedings of the 12th international offshore and polar engineering conference, Kitakyushu, Japan*, 2002.
- [4] W. C. Young and R. G. Budynas. *Roarks Formulas for Stress and Strain*. McGraw-Hill Company, Inc, seventh edition, 1989.
- [5] S.W. Yuan and L. Ting. On radial deflections of a cylinder subjected to equal and opposite concentrated radial loads. *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24(nº 6), 1957.
- [6] Patrick Laney. *Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas*. ASM International, 2002.
- [7] Martin Smith. Pipes, the history of piping. Online, 2013. Available from: <http://www.emergencyplumber.uk.com/plumbing/the-history-of-pipes/>.
- [8] Future Pipe Industries Group. Future pipe industries fiberglass book. Online, 2011. Available from: <http://www.futurepipe.com/en/Fiberglassbook.pdf>.
- [9] Petrobras. Oil platform p-51 (brazil). Online, 2009. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Oil_platform_P-51_%28Brazil%29.jpg.
- [10] United States Government. Arizona cap canal. Online, 2008. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Arizona_cap_canal.jpg.
- [11] Wikipedia. Petrochemical plant in saudi arabia. Online, 2009. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/File:TASNEE_001.jpg.
- [12] Reinforced Plastic Systems Inc. *Design Manual*. Reinforced Plastic Systems, Inc. Mahone Bay, Nova Scotia, Canada, 2000.
- [13] Ocean Machinery Inc. Pipe and tube bending methods. Online, 2013. Available from: <http://www.oceanmachinery.com/how-to-bend-pipe-and-tube.htm>.
- [14] William F. Hosford and Robert M. Caddell. *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, third edition, 2007.
- [15] George E. Dieter and David Bacon. *Mechanical Metallurgy SI Metric Edition*. McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [16] J. Wood. A review of literature for the structural assessment of mitred bends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, 2008.

- [17] So H. S. Single mitred pipe bends under bending and internal pressure loads. Technical report, MSc thesis, Victoria University of Manchester, 1971.
- [18] Bond M. P. A theoretical and experimental investigation of multimitred pipe bends subjected to various types of loading. *PhD thesis, Institute of Science and Technology, Victoria University of Manchester*, 1971.
- [19] Bond M. P. and Kitching R. Stress and flexibility factors for multi-mitred pipe bends subjected to internal pressure combined with external loadings. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 7(n^o 2), 1972.
- [20] Rodabaugh E. C. and George H. H. Effect of internal pressure on flexibility and stress intensification factors of curved pipe or welding elbows. *ASME 1957;79*, 1957.
- [21] Lane P. H. R. and Rose R. T. Experiments on fabricated pipe bends. *B.W.R.A. report no. D5/12/60*, 1960.
- [22] Bond M. P. and Kitching R. Stress and flexibility factors for multi-mitred bends subjected to out-of-plane bending. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 6, 1971.
- [23] Rodabaugh E. C. Review of data on mitre joints in piping to establish maximum angularity for fabrication of girth butt welds. *WRC Bulletin 208*, 1975.
- [24] Ingenhousz A. J. Grp mitred pipe bend. *Proceedings of the second international conference on composite materials, Toronto, Canada*, 1978.
- [25] Markl A. R. C. Fatigue tests of piping components. *ASME 1952;00:287?303*, 1952.
- [26] Kitching R. and Hose D. R. Experimental and theoretical stress analysis of multi-mitred lined glass reinforced plastic pipe bends. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, 1995.
- [27] Bond M. P. The in-plane bending of multi-mitred pipe bends. *MSc thesis, Institute of Science and Technology, Victoria University of Manchester*, 1969.
- [28] Kitching R. and Thompson W. J. In-plane bending of single unreinforced mitred pipe bends. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 5(n^o 1), 1970.
- [29] M. Xia, H. Takayanagi, and K. Kemmochi. Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure. *Composite Structures*, Vol. 53, 2001.
- [30] E. M. M. Fonseca, F. J. M. Q. de Melo, and C. A. M. Oliveira. Determination of flexibility factors in curved pipes with end restraints using a semi-analytic formulation. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, 2002.
- [31] Sobieszczanski J. Strength of a pipe mitred bend. *Jornal of Engineering for Industry*, 1970.
- [32] Kitching R., Rahimi G. H., and So H. S. Plastic collapse of single mitred pipe bends. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 38, 1971.
- [33] Rahimi G. H. Elastic?plastic behaviour of mitred pipe bends. *PhD thesis, University of Manchester*, 1991.
- [34] Babaii Kocheckseraii S. and Robinson M. Parametric survey of upper and lower bound limit in-plane bending moments for single mitred pipe bends of various geometries. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, 2002.

- [35] Babaii Kocheksaraai S. Mitred pipe bends subject to internal pressure and in-plane bending moment. *PhD thesis, University of Manchester*, 1994.
- [36] Babaii Kocheksaraai S. Finite element modelling of plastic collapse of metallic single mitred pipe bends subject to in-plane bending moments. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, 2004.
- [37] Hose D. R. Glass reinforced plastic pipework of mixed wall construction. *PhD thesis, University of Manchester*, 1988.
- [38] Babaii Kocheksaraai S. and Robinson M. Flexural behaviour of a polyvinyl chloride-lined glass reinforced plastic composite multimitred pipe bend subjected to combined loads: a comparative finite element analysis and experimental case study. *Journal of Strain Analysis*, Vol. 39(nº 2), 2002.
- [39] R. Neilson, J. Wood, R. Hamilton, and H. Li. A comparison of plastic collapse and limit loads for single mitred pipe bends under in-plane bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 87, 2010.
- [40] E. M. M. Fonseca, F. J. M. Q. de Melo, and C. A. M. Oliveira. Numerical analysis of piping elbows for in-plane bending and internal pressure. *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, 2006.
- [41] Jaroslav Mackerle. Finite element analysis and simulations of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985-2003). *Computational Materials Science*, Vol. 31, 2004.
- [42] Jaroslav Mackerle. Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping: a bibliography (1998-2001). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, 2002.
- [43] Jaroslav Mackerle. Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping: a bibliography (2001-2004). *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, 2005.
- [44] Frank C. Shen. A filament-wound structure technology overview. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 42(nº 96), 1995.
- [45] Technobell London Ltd. Fbd-e: Linha de produção de filamentos por bobinagem descontínua para condutas epóxi. Online, 2013. Available from: http://www.technobell.info/images/catalogues/por/gre_mini/GRE_dfw_por_mini.pdf.
- [46] Superlit. Superlit grp: Glass fiber reinforced polyester pipes and fittings. Online, 2010. Available from: <http://www.superlit.eu/administration/media/files/GRP%20product%20Catalogue.pdf>.
- [47] Technobell London Ltd. Tubos grp: Tubos de poliéster reforçado com fibra de vidro. Online, 2013. Available from: http://www.technobell.info/images/catalogues/por/gre_mini/GRE_pipes_por_mini.pdf.
- [48] Christopher E. Makselon and Matt Cullen. Wyoming operator discovers linepipe solution for cyclic pressure fluctuations. Technical report, Fiberspar Corporation, 2012. Available from: http://www.fiberspar.com/sites/default/files/casestudy_1.pdf.
- [49] W. Hufenbach, L. Kroll, R. Böhm, A. Langkampa, and A. Czulak. Piping elements from textile reinforced composite materials for chemical apparatus construction. *12th International Scientific Conference, Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, 2004.
- [50] J. P. Den Hartog. *Advanced Strength Of Materials*. Dover Publications Inc, 1987.

- [51] Gill S. S. *The Stress analysis of pressure vessels and pressure vessel components*. International series of monographs in mechanical engineering. Pergamon Press, 1970.
- [52] Marcelo F. S. F., Alfredo B. de Moraes, and António G. de Magalhães. *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Engebook - Conteúdos de Engenharia e Gestão, Lda, 2005.
- [53] V. I. Feodosiev. *Resistencia de Materiales*. Editorial MIR, 1980.
- [54] Gautam S. Chandekar, Bhushan S. Thatte, , and Ajit D. Kelkar. On the behavior of fiberglass epoxy composites under low velocity impact loading. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2010, 2010.
- [55] Inc Abaqus. *Abaqus CAE Analysis User's Manual, Volume IV: Elements, version 6.4*. Abaqus, Inc, 2003.
- [56] Dassault Systèmes. *Abaqus CAE Analysis User's Manual, Volume II: Analysis, version 6.10*. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.
- [57] Rizzo A. R. Estimating errors in fe analyses. *Mechanical Engineering ? CIME ? Computers in Mechanical Engineering*, Vol. 113(nº 5), 1991.
- [58] Inc Abaqus. *Abaqus CAE Analysis User's Manual, Volume V: Prescribed Conditions, Constraints and Interactions, version 6.11*. Abaqus, Inc, 2011.
- [59] Inc Abaqus. *Abaqus 6.11 Benchmarks Manual*. Abaqus, Inc, 2011.

Anexos



Código “Matlab” do Cálculo Analítico da Curva Segmentada Metálica

```
% Energia de Deformação de uma curva de 90° (smooth bend)

% Resolução analítica sobre a Energia de Deformação de uma curva Isotrópica

% Hipóteses simplificativas:
% -Ovalização constante;
% -inextensibilidade da linha de eixo da secção tubular.

close all
clear all
clc

%% Parâmetros de entrada:
syms z teta dalfa0 ex er Ux Ur U x K pf t alfa alfa0 lo r E nu pf R0

n=3 %termos a usar na aproximação de w

%,onde t-espessura da casca cilíndrica; w-deslocamento radial; w2-módulo de
%ovalização; v-deslocamento tangencial; z-coordenada definida a partir do plano
%médio da casca ao longo da espessura; teta-posição radial; alfa-ângulo que
%define o plano de segmentação; dalfa-variação de alfa; lo-comprimento da
%linha média do segmento; r-raio do segmento cilíndrico em relação ao plano
%médio da casca; ex-deformação axial; er-deformação radial; E-módulo de Young;
%Ux-termo axial de energia de deformação; Ur-termo radial de energia de deformação;
%U-energia de deformação total; nu-coeficiente de poisson; K-fator de flexibilidade;
%pf-pipe factor.

%% EXPRESSÕES PARA O DESLOCAMENTO, DEFORMAÇÃO E ENERGIA DE DEFORMAÇÃO

% Deslocamento radial: (n termos da série w=symsum(wn*cos(n*teta),2,n))
%cria vector wn do tipo [cos(2*teta),cos(3*teta),...,cos((n+1)*teta)], 1*n
for N=1:n;
    wn(N)=cos((N+1)*teta);
end

w=sym('w%d',[1 n]) %cria vector dos módulos de ovalização, 1*n
```

```

% Deformação radial:
Inc_er=[0,w]; %vector de incógnitas,1*n+1
er=[0, (-z/r^2*(wn+diff(wn,teta,2)))].*Inc_er; %vector deformação radial, 1*n+1

% Deformação axial:
vn=-int(wn,teta); % 1*n
Inc_ex=[dalfa0,w]; %vector de incógnitas,1*n+1
%vector funções de deformação axial, 1*n+1
f_Exw=[-((2*r*(cos(teta)))/(2*alfa0*R0)), ((wn*cos(teta))-(vn*sin(teta)))/R0)];

ex=f_Exw.*Inc_ex; %vector deformação axial,1*n+1

% Energia de deformação radial:
Ur=((E*R0)/(2*(1-nu^2)))*int(int(int((er.'*er),alfa,-alfa0,alfa0)*r,teta,0,2*pi),
z,-t/2,t/2);

% Energia de deformação axial:
Ux=((E*R0*t)/(2*(1-nu^2)))*int(int((ex.'*ex),alfa,-alfa0,alfa0)*r,teta,0,2*pi);

% Energia de deformação total:
U=sum(sum(Ur+Ux)); %para cálculo simbólico de U

% Minimizar a energia de deformação:
for N=1:n;
    dUdwN=diff(U,w(N));
    SwN=solve(dUdwN==0,w(N)); %(derivadas em ordem a w_n+1)
    Sw(N)=SwN;
end

[SSw]=solve(Sw==w); %resolução do sistema dU/dwi==0 em ordem a w_i
if isa(SSw,'sym')==1;
    A=SSw;
elseif isa(SSw,'sym')==0;
    [A]=struct2cell(SSw); %reestrutura o resultado anterior num array
end

Umin=simplify(subs(U,w,A.'));
M=(diff(Umin,(dalfa0))/2);

pretty(Umin) %mostra a expressão de Umin
pretty(M) %mostra a expressão de M

Mcyl=(pi*E*dalfa0*r^3*t)/(R0*alfa0*(1-nu^2));
K=Mcyl/M;

%K em função do pipe factor, pf
[num den]=numden(K); %separa o numerador e denominador
pf=(t*R0)/r^2;
if mod(n,2)==1
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    num=subs(expand(num/(r^((2*n)+2))),pf,'pf');
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    den=subs(expand(den/(r^((2*n)+2))),pf,'pf');
elseif mod(n,2)==0
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    num=subs(expand(num/(r^((2*(n-1))+2))),pf,'pf');
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    den=subs(expand(den/(r^((2*(n-1))+2))),pf,'pf');
end

K=num/den;
pretty(K) %mostra a expressão de K

```

```

%% CÁLCULO DA ENERGIA DE DEFORMAÇÃO, MOMENTO, K
%(caso de estudo, para dalfa0=0.001 rad)

% Parâmetros geométricos e de material:
E=198.125624872e9; %Pa
nu=0.29;
t=0.0015; %m
alfa0=pi/4; %radianos
r=0.04975; %m
lo=0.06; %m
alfaEQ=pi/12; %radianos (ângulo de segmentação)
R0=((lo/2)*cot(alfaEQ)); %m
pf=(t*R0)/r^2; %pipe factor
dalfa0=0.015; %radianos

%,onde t-espessura da casca cilíndrica; alfa0-ângulo que
%define o plano de segmentação; dalfa0-variação de alfa; lo-comprimento da
%linha média do segmento; r-raio do segmento cilíndrico em relação ao plano
%médio da casca; E-módulo de Young;
%nu-coeficiente de poisson; pf-pipe factor.

%energia de deformação, momento e fator de flexibilidade
Umin_t=vpa(subs(Umin))
M_t=vpa(subs(M))
K_t=vpa(subs(K))

%% RESULTADOS GRÁFICOS

%Resultados da metodologia analítica. (Umin e momento em função de dalfa0)
dalfa0=linspace(0,0.015,500); %vector dalfa0
Mdalfa0_t=vpa(subs(M)); %vector M_t em função de dalfa0
SEdalfa0_t=vpa(subs(Umin)); %vector SE_t em função de dalfa0

%Desenha os gráficos M/SE-dalfa0 teóricos obtidos nesta análise
figure(1);
grid on
hold on
plot(dalfa0,SEdalfa0_t,'b-');legend('Teórico');
ylabel('Energia de Deformação, U_{min} (J)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

figure(2);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mdalfa0_t,'b-');legend('Teórico');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Importa os dados do momento e energia de deformação em função de dalfa0,
%obtidos no Abaqus, para dalfa0=0.015 rad.
ABQ_NB15=importdata('M_SE_da_0.015_iso_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_a=ABQ_NB15(:,3);
Mdalfa0_a=ABQ_NB15(:,1);
SEdalfa0_a=ABQ_NB15(:,2);

%Desenha os gráficos M/SE-dalfa0, obtidos na simulação por EF,
%para comparar com os teóricos
figure(1);
plot(dalfa0_a,SEdalfa0_a,'rs');legend('Teórico','Abaqus');

figure(2);

```

```

plot(dalfa0_a,Mdalfa0_a,'r^');legend('Teórico','Abaqus');

%Resultados da metodologia analítica, para dalfa0=0.001 rad.
dalfa0=linspace(0,0.001,500); %vector dalfa0
Mdalfa0_t=vpa(subs(M)); %vector M_t em função de dalfa0

%Importa os dados do momento e energia de deformação em função de dalfa0,
%obtidos no Abaqus, para dalfa0=0.001 rad.
ABQ_NB1=importdata('M_SE_da_0.001_iso_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_a=ABQ_NB1(:,3);
Mdalfa0_a=ABQ_NB1(:,1);

%Importa os dados do momento em função de dalfa0, obtidos experimentalmente
EXP_NB1=importdata('M_da_0.001_iso_Exp.csv',';',0);
dalfa0_e=EXP_NB1(:,2);
Mdalfa0_e=EXP_NB1(:,1);

%Desenha os gráficos M-dalfa0, teóricos, experimentais e obtidos na
%simulação por EF, para dalfa0=0.001 rad.
figure(3);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mdalfa0_t,'b-');
plot(dalfa0_a,Mdalfa0_a,'rs');
plot(dalfa0_e,Mdalfa0_e,'g-','linewidth',2);
legend('Teórico','Abaqus','Experimental');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Tubo Reto Equivalente, Comparação entre métodos numéricos e analíticos

%Resultados da metodologia analítica, para dalfa0=0.015 rad.
dalfa0=linspace(0,0.015,500); %vector dalfa0
Mcycl_t=vpa(subs(Mcycl));

%Importa os dados do momento em função de dalfa0, obtidos no Abaqus,
%para dalfa0=0.015 rad.
ABQ_RE15=importdata('M_SE_da_0.015_iso_RetoEq_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_REa=ABQ_RE15(:,3);
Mdalfa0_REa=ABQ_RE15(:,1);

%Desenha os gráficos M-dalfa0 teóricos e obtidos por EF, para dalfa0=0.015 rad.
figure(4);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mcycl_t,'b-');
plot(dalfa0_REa,Mdalfa0_REa,'r^');legend('Teórico','Abaqus');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Resultados da metodologia analítica, para dalfa0=0.001 rad.
dalfa0=linspace(0,0.001,500); %vector dalfa0
Mcycl_t=vpa(subs(Mcycl));

%Importa os dados do momento em função de dalfa0, obtidos no Abaqus,
%para dalfa0=0.001 rad.
ABQ_RE15=importdata('M_SE_da_0.001_iso_RetoEq_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_REa=ABQ_RE15(:,3);
Mdalfa0_REa=ABQ_RE15(:,1);

%Desenha os gráficos M-dalfa0 teóricos e obtidos por EF, para dalfa0=0.001 rad.

```

```

figure(5);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mcyl_t,'b-');
plot(dalfa0_REa,Mdalfa0_REa,'r^');legend('Teórico','Abaqus');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% K EM FUNÇÃO DE PIPE FACTOR, COMPARAÇÃO ENTRE ESTA ANÁLISE E NORMAS INTERNACIONAIS

syms pf

%ANSI 1979
Kansi79=1.52./(pf.^ (5/6));

%Gresnit 1986
Kgresnit86=1.65./pf;

%NEN 1992
gama=1200*sqrt(t/(2*r));
Knen92=1+(Kgresnit86-1)*sqrt(1-((gama-(4*alfaEQ))/(gama))^2);

%vetor 'pipe factor'
pf=linspace(0.0001,0.7,500);

%Gráficos do fator de flexibilidade em função do pipe factor, de acordo com
%esta metodologia e normas internacionais
figure(6);
grid on; hold on;
axis([0 0.7 0 160]);
plot(pf,subs(K),'b-',pf,subs(Kansi79),'r-',pf,subs(Kgresnit86),'g-',
pf,subs(Knen92),'y-');
legend('Teórico','ANSI 79','Gresnigt 86','NEN 92');
ylabel('Fator de Flexibilidade, K');xlabel('Pipe factor, (t.Ro)/r^2');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Indica o fator de flexibilidade da curva segmentada em estudo, de acordo
%com os vários métodos apresentados e o obtido experimentalmente
figure(7);
grid on; hold on;
axis([0 0.25 0 50]);
plot(pf,subs(K),'b-',pf,subs(Kansi79),'r-',pf,subs(Kgresnit86),'g-',
pf,subs(Knen92),'y-');

pf=(t*R0)/r^2; %pipe factor
dalfa0=0.001; %rad

%Fator de flexibilidade experimental com base no momento teórico
K_expT=vpa(subs(Mcyl))/max(Mdalfa0_e);
%Fator de flexibilidade experimental com base no momento obtido no Abaqus
K_expA=max(Mdalfa0_REa)/max(Mdalfa0_e);
%Fator de flexibilidade apenas com base nos momentos obtidos no Abaqus
K_abq=max(Mdalfa0_REa)/max(Mdalfa0_a);

plot(pf,subs(K),'bs',pf,subs(Kansi79),'r^',pf,subs(Kgresnit86),'go',
pf,subs(Knen92),'y*');
plot(pf,K_expT,'kv',pf,K_expA,'m+',pf,K_abq,'c^','linewidth',2);
legend('Teórico','ANSI 79','Gresnigt 86','NEN 92','K_{Teórico}','K_{ANSI 79}',
'K_{Gresnigt 86}','K_{NEN92}','K_{Exp/Teórico}','K_{Exp/Abaqus}','K_{Abaqus}');
ylabel('Fator de Flexibilidade, K');xlabel('Pipe factor, (t.Ro)/r^2');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

```




Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos da Curva Segmentada Metálica

```
*Heading
** Job name: Negative_Bending_analysis Model name: Flutuante_mitre_AL
** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name="Steel Mitred Bend"
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name="Steel Mitred Bend-1", part="Steel Mitred Bend"
*Node
    1, 0.152316362, 0.288278401, 0.
    2, 0.138055399, 0.280044854, 0.
    3, 0.101086833, 0.317013413, -0.0505000018
    4, 0.0641182661, 0.353981972, 0.
    5, 0.101816356, 0.375746965, 0.
    6, 0.121588267, 0.251522928, 0.
    7, 0.0710882694, 0.265054375, -0.0505000018
    8, 0.0205882695, 0.278585792, 0.
    9, 0.121588267, 0.21858868, 0.
    10, 0.0710882694, 0.205057234, -0.0505000018
    11, 0.0205882695, 0.191525802, 0.
    12, 0.129821837, 0.204327717, 0.
    13, 0.0423532687, 0.153827727, 0.
    14, 0.101086833, 0.317013413, 0.0505000018
    15, 0.0710882694, 0.265054375, 0.0505000018
    16, 0.0710882694, 0.205057234, 0.0505000018
    17, 0.127000123, 0.291100115, -0.0360169001
    18, 0.0751735494, 0.342926681, -0.0360169001
    19, 0.109211907, 0.36293751, -0.0357088931
    20, 0.127066359, 0.332012683, -0.0505000018
```

21,	0.144920796,	0.301087886,	-0.0357088931
22,	0.129821837,	0.265783906,	0.
23,	0.106486477,	0.255569458,	-0.0360169001
24,	0.0356900655,	0.274539292,	-0.0360169001
25,	0.0423532687,	0.316283882,	0.
26,	0.121588267,	0.235055804,	0.
27,	0.106486477,	0.214542165,	-0.0360169001
28,	0.0356900655,	0.195572317,	-0.0360169001
29,	0.0205882695,	0.235055804,	0.
30,	0.117012359,	0.196932167,	-0.0357088931
31,	0.0860875547,	0.179077715,	-0.0505000018
32,	0.0551627427,	0.161223277,	-0.0357088931
33,	0.127000123,	0.291100115,	0.0360169001
34,	0.0751735494,	0.342926681,	0.0360169001
35,	0.106486477,	0.255569458,	0.0360169001
36,	0.0356900655,	0.274539292,	0.0360169001
37,	0.144920796,	0.301087886,	0.0357088931
38,	0.127066359,	0.332012683,	0.0505000018
39,	0.109211907,	0.36293751,	0.0357088931
40,	0.106486477,	0.214542165,	0.0360169001
41,	0.0356900655,	0.195572317,	0.0360169001
42,	0.0551627427,	0.161223277,	0.0357088931
43,	0.0860875547,	0.179077715,	0.0505000018
44,	0.117012359,	0.196932167,	0.0357088931
45,	0.116743296,	0.273334801,	-0.0360169038
46,	0.0860875547,	0.291033894,	-0.0505000018
47,	0.0554318056,	0.308732986,	-0.0360169001
48,	0.106486477,	0.235055804,	-0.0360169001
49,	0.0710882694,	0.235055804,	-0.0505000018
50,	0.0356900655,	0.235055804,	-0.0360169001
51,	0.116743296,	0.273334801,	0.0360169038
52,	0.0860875547,	0.291033894,	0.0505000018
53,	0.0554318056,	0.308732986,	0.0360169001
54,	0.106486477,	0.235055804,	0.0360169001
55,	0.0710882694,	0.235055804,	0.0505000018
56,	0.0356900655,	0.235055804,	0.0360169001
57,	0.145185873,	0.284161627,	0.
58,	0.135179743,	0.28292051,	-0.0195274223
59,	0.135960624,	0.296093702,	-0.0358632319
60,	0.150394306,	0.291607499,	-0.0193255153
61,	0.115086019,	0.303014219,	-0.0467391871
62,	0.114076599,	0.324513048,	-0.0505000018
63,	0.136729106,	0.315276295,	-0.0466559157
64,	0.0870876536,	0.331012577,	-0.0467391908
65,	0.0921925604,	0.352932394,	-0.0358632319
66,	0.117403597,	0.348749071,	-0.0466559194
67,	0.0669939369,	0.351106316,	-0.0195274279
68,	0.0829673111,	0.364864469,	0.
69,	0.103738397,	0.372417897,	-0.0193255115
70,	0.133938625,	0.27291438,	0.
71,	0.126419887,	0.267748028,	-0.0195274297
72,	0.121871702,	0.282217443,	-0.0360168964
73,	0.125705048,	0.258653432,	0.
74,	0.117660038,	0.252575517,	-0.0195274241
75,	0.111614883,	0.26445213,	-0.0360169038
76,	0.102648765,	0.281472296,	-0.0467391908
77,	0.0935871899,	0.304023653,	-0.0505000018
78,	0.0902115107,	0.259930313,	-0.0467391871
79,	0.078587912,	0.278044134,	-0.0505000018
80,	0.0695263445,	0.300595492,	-0.0467391945
81,	0.0653026775,	0.325829834,	-0.0360169038
82,	0.0519650318,	0.270178437,	-0.0467391871
83,	0.0455609336,	0.291636139,	-0.0360169001

84,	0.0457552113,	0.31431976,	-0.019527426
85,	0.0532357655,	0.335132927,	0.
86,	0.0245165005,	0.277533233,	-0.019527426
87,	0.0314707682,	0.297434837,	0.
88,	0.121588267,	0.243289366,	0.
89,	0.117660038,	0.235055804,	-0.0195274241
90,	0.106486477,	0.245312631,	-0.0360169001
91,	0.121588267,	0.226822242,	0.
92,	0.117660038,	0.217536107,	-0.0195274241
93,	0.106486477,	0.224798977,	-0.0360169001
94,	0.0902115107,	0.235055804,	-0.0467391871
95,	0.0710882694,	0.250055075,	-0.0505000018
96,	0.0902115107,	0.210181296,	-0.0467391871
97,	0.0710882694,	0.220056519,	-0.0505000018
98,	0.0519650318,	0.235055804,	-0.0467391908
99,	0.0356900655,	0.254797548,	-0.0360169001
100,	0.0519650318,	0.199933186,	-0.0467391871
101,	0.0356900655,	0.21531406,	-0.0360169001
102,	0.0245165005,	0.235055804,	-0.0195274241
103,	0.0205882695,	0.256820798,	0.
104,	0.0245165005,	0.192578375,	-0.019527426
105,	0.0205882695,	0.213290811,	0.
106,	0.125705048,	0.211458191,	0.
107,	0.126492754,	0.202405676,	-0.0193255134
108,	0.111749701,	0.205737337,	-0.0358632281
109,	0.102823935,	0.188740477,	-0.0466559157
110,	0.078587912,	0.192067474,	-0.0505000018
111,	0.0693511665,	0.169414967,	-0.0466559157
112,	0.0454261154,	0.178397641,	-0.0358632356
113,	0.0456823446,	0.155749768,	-0.0193255134
114,	0.0314707682,	0.172676757,	0.
115,	0.126419887,	0.267748028,	0.0195274297
116,	0.111614883,	0.26445213,	0.0360169038
117,	0.117660038,	0.252575517,	0.0195274241
118,	0.135179743,	0.28292051,	0.0195274223
119,	0.121871702,	0.282217443,	0.0360168964
120,	0.102648765,	0.281472296,	0.0467391908
121,	0.078587912,	0.278044134,	0.0505000018
122,	0.0902115107,	0.259930313,	0.0467391871
123,	0.115086019,	0.303014219,	0.0467391871
124,	0.0935871899,	0.304023653,	0.0505000018
125,	0.0695263445,	0.300595492,	0.0467391945
126,	0.0455609336,	0.291636139,	0.0360169001
127,	0.0519650318,	0.270178437,	0.0467391871
128,	0.0870876536,	0.331012577,	0.0467391908
129,	0.0653026775,	0.325829834,	0.0360169038
130,	0.0457552113,	0.31431976,	0.019527426
131,	0.0245165005,	0.277533233,	0.019527426
132,	0.0669939369,	0.351106316,	0.0195274279
133,	0.150394306,	0.291607499,	0.0193255153
134,	0.135960624,	0.296093702,	0.0358632319
135,	0.136729106,	0.315276295,	0.0466559157
136,	0.114076599,	0.324513048,	0.0505000018
137,	0.117403597,	0.348749071,	0.0466559194
138,	0.0921925604,	0.352932394,	0.0358632319
139,	0.103738397,	0.372417897,	0.0193255115
140,	0.117660038,	0.217536107,	0.0195274241
141,	0.111749701,	0.205737337,	0.0358632281
142,	0.126492754,	0.202405676,	0.0193255134
143,	0.0902115107,	0.210181296,	0.0467391871
144,	0.078587912,	0.192067474,	0.0505000018
145,	0.102823935,	0.188740477,	0.0466559157
146,	0.0519650318,	0.199933186,	0.0467391871

```

147, 0.0454261154, 0.178397641, 0.0358632356
148, 0.0693511665, 0.169414967, 0.0466559157
149, 0.0245165005, 0.192578375, 0.019527426
150, 0.0456823446, 0.155749768, 0.0193255134
151, 0.117660038, 0.235055804, 0.0195274241
152, 0.106486477, 0.224798977, 0.0360169001
153, 0.106486477, 0.245312631, 0.0360169001
154, 0.0902115107, 0.235055804, 0.0467391871
155, 0.0710882694, 0.220056519, 0.0505000018
156, 0.0710882694, 0.250055075, 0.0505000018
157, 0.0519650318, 0.235055804, 0.0467391908
158, 0.0356900655, 0.21531406, 0.0360169001
159, 0.0356900655, 0.254797548, 0.0360169001
160, 0.0245165005, 0.235055804, 0.0195274241
*Element, type=S8R
1, 1, 2, 17, 21, 57, 58, 59, 60
2, 21, 17, 3, 20, 59, 61, 62, 63
3, 20, 3, 18, 19, 62, 64, 65, 66
4, 19, 18, 4, 5, 65, 67, 68, 69
5, 2, 22, 45, 17, 70, 71, 72, 58
6, 22, 6, 23, 45, 73, 74, 75, 71
7, 17, 45, 46, 3, 72, 76, 77, 61
8, 45, 23, 7, 46, 75, 78, 79, 76
9, 3, 46, 47, 18, 77, 80, 81, 64
10, 46, 7, 24, 47, 79, 82, 83, 80
11, 18, 47, 25, 4, 81, 84, 85, 67
12, 47, 24, 8, 25, 83, 86, 87, 84
13, 6, 26, 48, 23, 88, 89, 90, 74
14, 26, 9, 27, 48, 91, 92, 93, 89
15, 23, 48, 49, 7, 90, 94, 95, 78
16, 48, 27, 10, 49, 93, 96, 97, 94
17, 7, 49, 50, 24, 95, 98, 99, 82
18, 49, 10, 28, 50, 97, 100, 101, 98
19, 24, 50, 29, 8, 99, 102, 103, 86
20, 50, 28, 11, 29, 101, 104, 105, 102
21, 9, 12, 30, 27, 106, 107, 108, 92
22, 27, 30, 31, 10, 108, 109, 110, 96
23, 10, 31, 32, 28, 110, 111, 112, 100
24, 28, 32, 13, 11, 112, 113, 114, 104
25, 6, 22, 51, 35, 73, 115, 116, 117
26, 22, 2, 33, 51, 70, 118, 119, 115
27, 35, 51, 52, 15, 116, 120, 121, 122
28, 51, 33, 14, 52, 119, 123, 124, 120
29, 15, 52, 53, 36, 121, 125, 126, 127
30, 52, 14, 34, 53, 124, 128, 129, 125
31, 36, 53, 25, 8, 126, 130, 87, 131
32, 53, 34, 4, 25, 129, 132, 85, 130
33, 2, 1, 37, 33, 57, 133, 134, 118
34, 33, 37, 38, 14, 134, 135, 136, 123
35, 14, 38, 39, 34, 136, 137, 138, 128
36, 34, 39, 5, 4, 138, 139, 68, 132
37, 12, 9, 40, 44, 106, 140, 141, 142
38, 44, 40, 16, 43, 141, 143, 144, 145
39, 43, 16, 41, 42, 144, 146, 147, 148
40, 42, 41, 11, 13, 147, 149, 114, 150
41, 9, 26, 54, 40, 91, 151, 152, 140
42, 26, 6, 35, 54, 88, 117, 153, 151
43, 40, 54, 55, 16, 152, 154, 155, 143
44, 54, 35, 15, 55, 153, 122, 156, 154
45, 16, 55, 56, 41, 155, 157, 158, 146
46, 55, 15, 36, 56, 156, 127, 159, 157
47, 41, 56, 29, 11, 158, 160, 105, 149
48, 56, 36, 8, 29, 159, 131, 103, 160

```

```

*Nset, nset=_PickedSet7, internal, generate
    1, 160, 1
*Elset, elset=_PickedSet7, internal, generate
    1, 48, 1
** Section: Steel Section
*Shell Section, elset=_PickedSet7, material="Steel Roark", offset=SPOS
0.0015, 7
*End Instance
**
*Node
    1, 0.0900000036, 0.177000001, 0.
*Node
    2, 0.1299999995, 0.340000004, 0.
*Nset, nset=_PickedSet22, internal
    2,
*Nset, nset=_PickedSet23, internal
    1,
*Nset, nset=RP1
    1,
*Nset, nset=RP2
    2,
*Nset, nset=_PickedSet152, internal
    2,
*Nset, nset=_PickedSet153, internal
    1,
*Nset, nset=_PickedSet154, internal
    2,
*Nset, nset=_PickedSet157, internal
    1,
*Nset, nset=_PickedSet167, internal
    2,
*Nset, nset=_PickedSet168, internal
    2,
*Nset, nset=_PickedSet169, internal
    2,
*Nset, nset=_PickedSet170, internal
    1,
*Nset, nset=_PickedSet171, internal
    1,
*Nset, nset=_PickedSet172, internal
    1,
*Nset, nset=_PickedSet328, internal, instance="Steel Mitred Bend-1"
    9, 11, 12, 13, 106, 114
*Elset, elset=_PickedSet328, internal, instance="Steel Mitred Bend-1"
    21, 24, 37, 40
*Nset, nset=_PickedSet329, internal, instance="Steel Mitred Bend-1"
    1, 2, 4, 5, 57, 68
*Elset, elset=_PickedSet329, internal, instance="Steel Mitred Bend-1"
    1, 4, 33, 36
*Nset, nset="BC 1_2", instance="Steel Mitred Bend-1"
    22, 25, 70, 73, 85, 87
*Nset, nset="BC 1_3", instance="Steel Mitred Bend-1"
    26, 29, 88, 91, 103, 105
*Nset, nset="bottom - pivot", instance="Steel Mitred Bend-1"
    30, 31, 32, 42, 43, 44, 107, 109, 111, 113, 142, 145, 148, 150
*Nset, nset="bottom pivot", instance="Steel Mitred Bend-1"
    12, 13
*Nset, nset="bottom hS1", instance="Steel Mitred Bend-1"
    12, 13, 30, 31, 32, 42, 43, 44, 107, 109, 111, 113, 142, 145, 148, 150
*Nset, nset="symm x", instance="Steel Mitred Bend-1"
    7, 15, 23, 24, 35, 36, 74, 78, 82, 86, 117, 122, 127, 131
*Nset, nset="symm x pivot", instance="Steel Mitred Bend-1"
    6, 8

```

```

*Nset, nset="top pivot", instance="Steel Mitred Bend-1"
1, 5
*Nset, nset="top hS2", instance="Steel Mitred Bend-1"
1, 5, 19, 20, 21, 37, 38, 39, 60, 63, 66, 69, 133, 135, 137, 139
*Nset, nset="top - pivot", instance="Steel Mitred Bend-1"
19, 20, 21, 37, 38, 39, 60, 63, 66, 69, 133, 135, 137, 139
*Surface, type=NODE, name="bottom hS1_CNS_", internal
"bottom hS1", 1.
*Surface, type=NODE, name="top hS2_CNS_", internal
"top hS2", 1.
*Surface, type=NODE, name="bottom pivot_CNS_", internal
"bottom pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="top pivot_CNS_", internal
"top pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="bottom - pivot_CNS_", internal
"bottom - pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="top - pivot_CNS_", internal
"top - pivot", 1.
*Nset, nset="_T-Datum csys-2", internal
"symm x pivot",
"symm x",
*Transform, nset="_T-Datum csys-2"
0., 0., -1., -0.965925826289068, 0.258819045102521, 0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-5", internal
_PickedSet328,
_PickedSet170,
_PickedSet171,
_PickedSet172,
_PickedSet23,
*Transform, nset="_T-Datum csys-5"
-0.5, 0.866025403784439, -4.12317467480924e-16, -0.866025403784439, -0.5, 0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-1", internal
_PickedSet329,
_PickedSet167,
_PickedSet168,
_PickedSet169,
_PickedSet22,
*Transform, nset="_T-Datum csys-1"
-0.866025403784439, -0.5, 0., -0.5, 0.866025403784439, 0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-4", internal
"BC 1_2",
*Transform, nset="_T-Datum csys-4"
0., 1., 0., -1., 0., 0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-3", internal
"BC 1_3",
*Transform, nset="_T-Datum csys-3"
0.5, 0.866025403784439, 0., -0.866025403784439, 0.5, 0.
*Orientation, name="Datum csys-5"
-0.5, 0.866025403784439, -4.12317467480924e-16, -0.866025403784439, -0.5, 0.
1, 0.
*Orientation, name="Datum csys-1"
-0.866025403784439, -0.5, 0., -0.5, 0.866025403784439, 0.
1, 0.
** Constraint: Dcoup_1
*Coupling, constraint name=Dcoup_1, ref node=_PickedSet153,
surface="bottom hS1_CNS_", orientation="Datum csys-5"
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Dcoup_2
*Coupling, constraint name=Dcoup_2, ref node=_PickedSet152, surface="top hS2_CNS_",
orientation="Datum csys-1"
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Kcoup 1_1
*Coupling, constraint name="Kcoup 1_1", ref node=_PickedSet157,

```

```

surface="bottom pivot_CNS_", orientation="Datum csys-5"
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup 1_2
*Coupling, constraint name="Kcoup 1_2", ref node=_PickedSet154,
surface="top pivot_CNS_", orientation="Datum csys-1"
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup 2_1
*Coupling, constraint name="Kcoup 2_1", ref node=RP1, surface="bottom - pivot_CNS_",
orientation="Datum csys-5"
*Kinematic
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup 2_2
*Coupling, constraint name="Kcoup 2_2", ref node=RP2, surface="top - pivot_CNS_",
orientation="Datum csys-1"
*Kinematic
5, 5
6, 6
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name="Steel Roark"
*Elastic
1.98126e+11, 0.29
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1,2 P Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"symm x pivot", 1, 1
"symm x pivot", 3, 3
"symm x pivot", 4, 4
"symm x pivot", 5, 5
"symm x pivot", 6, 6
** Name: BC-1_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet328, 3, 3
_PickedSet328, 4, 4
_PickedSet328, 5, 5
** Name: BC-1_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 1_2", 3, 3
"BC 1_2", 4, 4
"BC 1_2", 5, 5
** Name: BC-1_3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 1_3", 3, 3
"BC 1_3", 4, 4
"BC 1_3", 5, 5
** Name: BC-1_4 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet329, 3, 3

```

```

_PickedSet329, 4, 4
_PickedSet329, 5, 5
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"symm x", 3, 3
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"symm x", 4, 4
"symm x", 5, 5
** Name: BC-4_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet170, 4, 4
_PickedSet170, 5, 5
** Name: BC-4_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet167, 4, 4
_PickedSet167, 5, 5
** Name: BC-5_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet171, 2, 2
_PickedSet171, 3, 3
** Name: BC-5_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet168, 2, 2
_PickedSet168, 3, 3
** Name: BC-6_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet172, 2, 2
** Name: BC-6_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet169, 2, 2
**
**
** STEP: Angular load
**
*Step, name="Angular load", nlgeom=YES
*Static
0.05, 1., 1e-05, 0.1
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: angular load 1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet23, 6, 6, -0.02
** Name: angular load 2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet22, 6, 6, -0.02
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
RF, U, UR
*Element Output, directions=YES
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
E, EE, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**

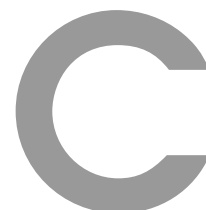
```



```

*Output, history
*Energy Output
ALLSE,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**
*Node Output, nset=RP1
RF1, RF2, RF3, RM, RM1, RM2, RM3, U1
U2, U3, UR, UR1, UR2, UR3
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
**
*Node Output, nset=RP2
RF1, RF2, RF3, RM, RM1, RM2, RM3, U1
U2, U3, UR, UR1, UR2, UR3
*End Step

```

Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos do Tubo Reto Equivalente Metálico

```
*Heading
** Job name: Equivalent_cyl__analysis Model name: Flutuante_cyl_AL
** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=EqSteelCyl
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=EqSteelCyl-1, part=EqSteelCyl
*Node
    1,          0., 0.0712499991, -0.0505000018
    2,          0., -0.0167500004, -0.0505000018
    3, -0.0505000018, -0.0167500004,          0.
    4, -0.0505000018, 0.0712499991,          0.
    5,          0., -0.0167500004, 0.0505000018
    6,          0., 0.0712499991, 0.0505000018
    7,          0., 0.1592500006, -0.0505000018
    8, -0.0505000018, 0.1592500006,          0.
    9,          0., 0.1592500006, 0.0505000018
   10,          0., 0.0272499993, -0.0505000018
   11, -0.0357088931, -0.0167500004, -0.0357088931
   12, -0.0505000018, 0.0272499993,          0.
   13, -0.0357088931, 0.0712499991, -0.0357088931
   14,          0., 0.0272499993, 0.0505000018
   15, -0.0357088931, 0.0712499991, 0.0357088931
   16, -0.0357088931, -0.0167500004, 0.0357088931
   17,          0., 0.115249999, -0.0505000018
   18, -0.0505000018, 0.115249999,          0.
   19, -0.0357088931, 0.1592500006, -0.0357088931
   20,          0., 0.115249999, 0.0505000018
```

21, -0.0357088931, 0.159250006, 0.0357088931
 22, 0.0357088931, 0.0712499991, 0.0357088931
 23, 0.0505000018, 0.0712499991, 0.
 24, 0.0357088931, 0.0712499991, -0.0357088931
 25, 0.0357088931, 0.159250006, -0.0357088931
 26, 0.0505000018, 0.159250006, 0.
 27, 0.0357088931, 0.159250006, 0.0357088931
 28, 0.0357088931, -0.0167500004, 0.0357088931
 29, 0.0505000018, -0.0167500004, 0.
 30, 0.0357088931, -0.0167500004, -0.0357088931
 31, -0.0357088931, 0.0272499993, -0.0357088931
 32, -0.0357088931, 0.0272499993, 0.0357088931
 33, -0.0357088931, 0.115249999, -0.0357088931
 34, -0.0357088931, 0.115249999, 0.0357088931
 35, 0.0357088931, 0.115249999, 0.0357088931
 36, 0.0505000018, 0.115249999, 0.
 37, 0.0357088931, 0.115249999, -0.0357088931
 38, 0.0357088931, 0.0272499993, 0.0357088931
 39, 0.0505000018, 0.0272499993, 0.
 40, 0.0357088931, 0.0272499993, -0.0357088931
 41, 0., 0.0492499992, -0.0505000018
 42, -0.0193255134, 0.0272499993, -0.0466559157
 43, -0.0357088931, 0.0492499992, -0.0357088931
 44, -0.0193255134, 0.0712499991, -0.0466559157
 45, 0., 0.00524999946, -0.0505000018
 46, -0.0193255134, -0.0167500004, -0.0466559157
 47, -0.0357088931, 0.00524999946, -0.0357088931
 48, -0.0466559157, 0.0272499993, -0.0193255134
 49, -0.0505000018, 0.0492499992, 0.
 50, -0.0466559157, 0.0712499991, -0.0193255134
 51, -0.0466559157, -0.0167500004, -0.0193255134
 52, -0.0505000018, 0.00524999946, 0.
 53, 0., 0.00524999946, 0.0505000018
 54, -0.0193255134, 0.0272499993, 0.0466559157
 55, -0.0357088931, 0.00524999946, 0.0357088931
 56, -0.0193255134, -0.0167500004, 0.0466559157
 57, 0., 0.0492499992, 0.0505000018
 58, -0.0193255134, 0.0712499991, 0.0466559157
 59, -0.0357088931, 0.0492499992, 0.0357088931
 60, -0.0466559157, 0.0272499993, 0.0193255134
 61, -0.0466559157, -0.0167500004, 0.0193255134
 62, -0.0466559157, 0.0712499991, 0.0193255134
 63, 0., 0.137250006, -0.0505000018
 64, -0.0193255134, 0.115249999, -0.0466559157
 65, -0.0357088931, 0.137250006, -0.0357088931
 66, -0.0193255134, 0.159250006, -0.0466559157
 67, 0., 0.093249999, -0.0505000018
 68, -0.0357088931, 0.093249999, -0.0357088931
 69, -0.0466559157, 0.115249999, -0.0193255134
 70, -0.0505000018, 0.137250006, 0.
 71, -0.0466559157, 0.159250006, -0.0193255134
 72, -0.0505000018, 0.093249999, 0.
 73, 0., 0.093249999, 0.0505000018
 74, -0.0193255134, 0.115249999, 0.0466559157
 75, -0.0357088931, 0.093249999, 0.0357088931
 76, 0., 0.137250006, 0.0505000018
 77, -0.0193255134, 0.159250006, 0.0466559157
 78, -0.0357088931, 0.137250006, 0.0357088931
 79, -0.0466559157, 0.115249999, 0.0193255134
 80, -0.0466559157, 0.159250006, 0.0193255134
 81, 0.0193255134, 0.115249999, 0.0466559157
 82, 0.0357088931, 0.137250006, 0.0357088931
 83, 0.0193255134, 0.159250006, 0.0466559157

```

84, 0.0193255134, 0.0712499991, 0.0466559157
85, 0.0357088931, 0.093249999, 0.0357088931
86, 0.0466559157, 0.115249999, 0.0193255134
87, 0.0505000018, 0.137250006, 0.
88, 0.0466559157, 0.159250006, 0.0193255134
89, 0.0466559157, 0.0712499991, 0.0193255134
90, 0.0505000018, 0.093249999, 0.
91, 0.0466559157, 0.115249999, -0.0193255134
92, 0.0357088931, 0.137250006, -0.0357088931
93, 0.0466559157, 0.159250006, -0.0193255134
94, 0.0466559157, 0.0712499991, -0.0193255134
95, 0.0357088931, 0.093249999, -0.0357088931
96, 0.0193255134, 0.115249999, -0.0466559157
97, 0.0193255134, 0.159250006, -0.0466559157
98, 0.0193255134, 0.0712499991, -0.0466559157
99, 0.0193255134, 0.0272499993, 0.0466559157
100, 0.0357088931, 0.0492499992, 0.0357088931
101, 0.0193255134, -0.0167500004, 0.0466559157
102, 0.0357088931, 0.00524999946, 0.0357088931
103, 0.0466559157, 0.0272499993, 0.0193255134
104, 0.0505000018, 0.0492499992, 0.
105, 0.0466559157, -0.0167500004, 0.0193255134
106, 0.0505000018, 0.00524999946, 0.
107, 0.0466559157, 0.0272499993, -0.0193255134
108, 0.0357088931, 0.0492499992, -0.0357088931
109, 0.0466559157, -0.0167500004, -0.0193255134
110, 0.0357088931, 0.00524999946, -0.0357088931
111, 0.0193255134, 0.0272499993, -0.0466559157
112, 0.0193255134, -0.0167500004, -0.0466559157
*Element, type=S8R
1, 1, 10, 31, 13, 41, 42, 43, 44
2, 10, 2, 11, 31, 45, 46, 47, 42
3, 13, 31, 12, 4, 43, 48, 49, 50
4, 31, 11, 3, 12, 47, 51, 52, 48
5, 5, 14, 32, 16, 53, 54, 55, 56
6, 14, 6, 15, 32, 57, 58, 59, 54
7, 16, 32, 12, 3, 55, 60, 52, 61
8, 32, 15, 4, 12, 59, 62, 49, 60
9, 7, 17, 33, 19, 63, 64, 65, 66
10, 17, 1, 13, 33, 67, 44, 68, 64
11, 19, 33, 18, 8, 65, 69, 70, 71
12, 33, 13, 4, 18, 68, 50, 72, 69
13, 6, 20, 34, 15, 73, 74, 75, 58
14, 20, 9, 21, 34, 76, 77, 78, 74
15, 15, 34, 18, 4, 75, 79, 72, 62
16, 34, 21, 8, 18, 78, 80, 70, 79
17, 9, 20, 35, 27, 76, 81, 82, 83
18, 20, 6, 22, 35, 73, 84, 85, 81
19, 27, 35, 36, 26, 82, 86, 87, 88
20, 35, 22, 23, 36, 85, 89, 90, 86
21, 26, 36, 37, 25, 87, 91, 92, 93
22, 36, 23, 24, 37, 90, 94, 95, 91
23, 25, 37, 17, 7, 92, 96, 63, 97
24, 37, 24, 1, 17, 95, 98, 67, 96
25, 6, 14, 38, 22, 57, 99, 100, 84
26, 14, 5, 28, 38, 53, 101, 102, 99
27, 22, 38, 39, 23, 100, 103, 104, 89
28, 38, 28, 29, 39, 102, 105, 106, 103
29, 23, 39, 40, 24, 104, 107, 108, 94
30, 39, 29, 30, 40, 106, 109, 110, 107
31, 24, 40, 10, 1, 108, 111, 41, 98
32, 40, 30, 2, 10, 110, 112, 45, 111
*Nset, nset=_PickedSet24, internal

```

```

3, 4, 8, 12, 18, 49, 52, 70, 72
*Elset, elset=_PickedSet24, internal
3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16
*Nset, nset=_PickedSet68, internal, generate
1, 112, 1
*Elset, elset=_PickedSet68, internal, generate
1, 32, 1
*Elset, elset=__PickedSurf23_SPOS, internal, generate
1, 32, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf23, internal
__PickedSurf23_SPOS, SPOS
** Section: Steel Section
*Shell Section, elset=_PickedSet68, material="Steel Roark"
0.0015, 7
*End Instance
**
*Node
1, 0., -0.01999999996, 0.
*Node
2, 0., 0.1599999996, 0.
*Nset, nset=_PickedSet22, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet23, internal
1,
*Nset, nset=RP1
1,
*Nset, nset=RP2
2,
*Nset, nset=_PickedSet76, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet77, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet80, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet81, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet82, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet83, internal
1,
*Nset, nset="BC 1", instance=EqSteelCyl-1
1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 17, 20, 41, 45, 53, 57, 63, 67
73, 76
*Elset, elset="BC 1", instance=EqSteelCyl-1
1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 17, 18, 23, 24, 25, 26, 31, 32
*Nset, nset="BC 2,3", instance=EqSteelCyl-1
1, 4, 6, 13, 15, 22, 23, 24, 44, 50, 58, 62, 84, 89, 94, 98
*Elset, elset="BC 2,3", instance=EqSteelCyl-1
1, 3, 6, 8, 10, 12, 13, 15, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 31
*Nset, nset=all, instance=EqSteelCyl-1, generate
1, 112, 1
*Nset, nset=bottom, instance=EqSteelCyl-1
2, 3, 5, 11, 16, 28, 29, 30, 46, 51, 56, 61, 101, 105, 109, 112
*Nset, nset=top, instance=EqSteelCyl-1
7, 8, 9, 19, 21, 25, 26, 27, 66, 71, 77, 80, 83, 88, 93, 97
*Nset, nset="top pivot", instance=EqSteelCyl-1
7, 9
*Nset, nset="bottom pivot", instance=EqSteelCyl-1
2, 5
*Nset, nset=bottom-pivot, instance=EqSteelCyl-1
3, 11, 16, 28, 29, 30, 46, 51, 56, 61, 101, 105, 109, 112
*Nset, nset=top-pivot, instance=EqSteelCyl-1
8, 19, 21, 25, 26, 27, 66, 71, 77, 80, 83, 88, 93, 97

```

```

*Surface, type=NODE, name=bottom_CNS_, internal
bottom, 1.
*Surface, type=NODE, name=top_CNS_, internal
top, 1.
*Surface, type=NODE, name="bottom pivot_CNS_", internal
"bottom pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="top pivot_CNS_", internal
"top pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name=bottom-pivot_CNS_, internal
bottom-pivot, 1.
*Surface, type=NODE, name=top-pivot_CNS_, internal
top-pivot, 1.
** Constraint: Dcoup_1
*Coupling, constraint name=Dcoup_1, ref node=_PickedSet81, surface=bottom_CNS_
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Dcoup_2
*Coupling, constraint name=Dcoup_2, ref node=_PickedSet76, surface=top_CNS_
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Kcoup1_1
*Coupling, constraint name=Kcoup1_1, ref node=_PickedSet82,
surface="bottom pivot_CNS_"
*Kinematic
1, 1
2, 2
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup1_2
*Coupling, constraint name=Kcoup1_2, ref node=_PickedSet77, surface="top pivot_CNS_"
*Kinematic
1, 1
2, 2
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup2_1
*Coupling, constraint name=Kcoup2_1, ref node=_PickedSet83,
surface=bottom-pivot_CNS_
*Kinematic
4, 4
6, 6
** Constraint: Kcoup2_2
*Coupling, constraint name=Kcoup2_2, ref node=_PickedSet80, surface=top-pivot_CNS_
*Kinematic
4, 4
6, 6
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name="Steel Roark"
*Elastic
1.98126e+11, 0.29
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 1", 1, 1
"BC 1", 5, 5
"BC 1", 6, 6
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary

```

```

"BC 2,3", 2, 2
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 2,3", 4, 4
"BC 2,3", 6, 6
** Name: BC-4_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP1, 5, 5
RP1, 6, 6
** Name: BC-4_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP2, 5, 5
RP2, 6, 6
** Name: BC-5_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP1, 1, 1
RP1, 3, 3
** Name: BC-5_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP2, 1, 1
RP2, 3, 3
** Name: BC-6_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP1, 3, 3
** Name: BC-6_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP2, 3, 3
**
**
** STEP: Angular load
**
*Step, name="Angular load", nlgeom=YES
*Static
0.05, 1., 1e-05, 0.2
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
"BC 1", 1, 1
"BC 1", 5, 5
"BC 1", 6, 6
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
"BC 2,3", 2, 2
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
"BC 2,3", 4, 4
"BC 2,3", 6, 6
** Name: BC-4_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
RP1, 5, 5
RP1, 6, 6
** Name: BC-4_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
RP2, 5, 5
RP2, 6, 6
** Name: BC-5_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
RP1, 1, 1
RP1, 3, 3
** Name: BC-5_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW

```



```

RP2, 1, 1
RP2, 3, 3
** Name: BC-6_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
RP1, 3, 3
** Name: BC-6_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
RP2, 3, 3
** Name: angular load 1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
_PickedSet23, 4, 4, 0.001
** Name: angular load 2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
_PickedSet22, 4, 4, -0.001
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
RF, U, UR
*Element Output, directions=YES
E, EE, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history
*Energy Output
ALLSE,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**
*Node Output, nset=RP1
RF1, RF2, RF3, RM1, RM2, RM3, U1, U2
U3, UR1, UR2, UR3
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
**
*Node Output, nset=RP2
RF1, RF2, RF3, RM, RM1, RM2, RM3, RT
U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3
*End Step

```




Código “Matlab” do Cálculo Analítico da Curva Segmentada Compósita

```
% Energia de Deformação de uma curva de 90° (smooth bend)

% Resolução analítica sobre a Energia de Deformação de uma curva Compósita

% Hipóteses simplificativas:
% -Ovalização constante;
% -inextensibilidade da linha de eixo da secção tubular.

close all
clear all
clc

%% Parâmetros de entrada:
syms z teta dalfa0 ex er Uxc Urc Uc x K pf t alfa alfa0 lo r Ex Et nuxt R0

n=3 %termos a usar na aproximação de w

%,onde t-espessura da casca cilíndrica; w-deslocamento radial; w2-módulo de
%ovalização; v-deslocamento tangencial; z-coordenada definida a partir do
%plano médio da casca ao longo da espessura; teta-posição radial; alfa-ângulo que
%define o plano de segmentação; dalfa-variação de alfa; lo-comprimento da
%linha média do segmento; r-raio do segmento cilíndrico em relação ao plano
%médio da casca; ex-deformação axial; er-deformação radial; Ex-módulo de Young na
%direção axial; Et-módulo de Young na direção tangencial; Ux-termo axial de
%energia deformação; Ur-termo radial de energia deformação; U-energia deformação
%total; nu-coeficiente de poisson; K-fator de flexibilidade; pf-pipe factor.

%% EXPRESSÕES PARA O DESLOCAMENTO, DEFORMAÇÃO E ENERGIA DE DEFORMAÇÃO

% Deslocamento radial: (n termos da série w=symsum(wn*cos(n*teta),2,n))
%cria vector wn do tipo [cos(2*teta),cos(3*teta),...,cos((n+1)*teta)], 1*n
for N=1:n;
    wn(N)=cos((N+1)*teta);
end

w=sym('w%d',[1 n]) %cria vector dos módulos de ovalização, 1*n
```

```

% Deformação radial:
Inc_er=[0,w]; %vector de incógnitas,1*n+1
er=[0, (-z/r^2*(wn+diff(wn,teta,2)))].*Inc_er; %vector deformação radial, 1*n+1

% Deformação axial:
vn=-int(wn,teta); % 1*n
Inc_ex=[dalfa0,w]; %vector de incógnitas,1*n+1
%vector funções de deformação axial, 1*n+1
f_Exw=[-((2*r*(cos(teta)))/(2*alfa0*R0)),((wn*cos(teta))-(vn*sin(teta)))/R0)];

ex=f_Exw.*Inc_ex; %vector deformação axial,1*n+1

% Energia de deformação radial:
Urc=(( (Et*R0)/(2*(1-(nuxt^2))))*int(int(int((er.'*er),alfa,-(alfa0),alfa0)*r,
teta,0,2*pi),z,-t/2,t/2));

% Energia de deformação axial:
Uxc=(( (Ex*R0*t)/(2*(1-(nuxt^2))))*int(int((ex.'*ex),alfa,-(alfa0),alfa0)*r,
teta,0,2*pi));

% Energia de deformação total:
Uc=sum(sum(Urc+Uxc)); %para cálculo simbólico de Uc

% Minimizar a energia de deformação:
for N=1:n;
    dUdwN=diff(Uc,w(N));
    SwN=solve(dUdwN==0,w(N)); %(derivadas em ordem a w_n+1)
    Sw(N)=SwN;
end

[SSw]=solve(Sw==w); %resolução do sistema dU/dwi==0 em ordem a w_i
if isa(SSw,'sym')==1;
    A=SSw;
elseif isa(SSw,'sym')==0;
    [A]=struct2cell(SSw); %reestrutura o resultado anterior num array
end

Uminc=simplify(subs(Uc,w,A.'));
Mc=(diff(Uminc,(dalfa0)))/2;

pretty(Uminc) %mostra a expressão de Umin
pretty(Mc) %mostra a expressão de M

Mcyl=(pi*Ex*dalfa0*r^3*t)/(R0*alfa0*(1-nuxt^2));
Kc=Mcyl/Mc;

%K em função do pipe factor, pf
[num den]=numden(Kc); %separa o numerador e denominador
pf=(t*R0)/r^2;
if mod(n,2)==1
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    num=subs(expand(num/(r^((2*n)+2))),pf,'pf');
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    den=subs(expand(den/(r^((2*n)+2))),pf,'pf');
elseif mod(n,2)==0
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    num=subs(expand(num/(r^((2*(n-1))+2))),pf,'pf');
    %substitui pf=(t*R0)/r^2 na expressão
    den=subs(expand(den/(r^((2*(n-1))+2))),pf,'pf');
end

Kc=num/den;
pretty(Kc) %mostra a expressão de K

```

```

%% CÁLCULO DA ENERGIA DE DEFORMAÇÃO, MOMENTO, K
%(caso de estudo, para dalfa0=0.001 rad)

%Parâmetros geométricos:
alfa0=pi/4; %radianos
lo=0.06; %m
alfaEQ=pi/12; %radianos (ângulo de segmentação)
R0=((lo/2)*cot(alfaEQ)); %m
t=0.0015; %m, espessura do tubo
r=0.04975; %raio médio fixo
pf=(t*R0)/r^2; %pipe factor
dalfa0=0.001; %radianos
WA=55 %WA – winding angle (graus)

%Parâmetros do material:
E1=38300000000; %Pascal
E2=10560000000; %Pascal
nu12=0.29;
G12=3960000000; %Pascal

C=cosd(WA);
S=sind(WA);

Ex=((C^4)/(E1))+((S^4)/(E2))+((C*S)^2)*((1/G12)-((2*nu12)/(E1))))^(-1); %Pascal
Et=((S^4)/(E1))+((C^4)/(E2))+((C*S)^2)*((1/G12)-((2*nu12)/(E1))))^(-1); %Pascal
nuxt=((((C^4)+(S^4))*(nu12/E1))-((C*S)^2)*((1/E1)+(1/E2)-(1/G12))))/
(((C^4)/(E1))+((S^4)/(E2))+((C*S)^2)*((1/G12)-((2*nu12)/(E1))))); %Pascal
Gxt=(4*(C*S)^2*((1/E1)+(1/E2)+2*(nu12/E1))+((C^2-S^2)^2/G12))^(-1); %Pascal

%energia de deformação e momento
Uminc_t=vpa(subs(Uminc))
Mc_t=vpa(subs(Mc))
K_t=vpa(subs(Kc))

%% RESULTADOS GRÁFICOS

%Resultados da metodologia analítica. (Umin e momento em função de dalfa0)
dalfa0=linspace(0,0.015,500); %vector dalfa0
Mdalfa0_t=subs(Mc); %vector M_t em função de dalfa0
SEdalfa0_t=subs(Uminc); %vector SE_t em função de dalfa0

%Desenha os gráficos M/SE-dalfa0 teóricos obtidos nesta análise
figure(1);
grid on
hold on
plot(dalfa0,SEdalfa0_t,'b-');legend('Teórico');
ylabel('Energia de Deformação, U_{min} (J)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

figure(2);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mdalfa0_t,'b-');legend('Teórico');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Importa os dados do momento e energia de deformação em função de dalfa0,
%obtidos no Abaqus, para dalfa0=0.015 rad.
ABQ_NB15=importdata('M_SE_da_0.015_comp_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_a=ABQ_NB15(:,3);

```

```

Mdalfa0_a=ABQ_NB15(:,1);
SEdalfa0_a=ABQ_NB15(:,2);

%Desenha os gráficos M/SE-dalfa0, obtidos na simulação por EF,
%para comparar com os teóricos
figure(1);
plot(dalfa0_a,SEdalfa0_a,'rs');legend('Teórico','Abaqus');

figure(2);
plot(dalfa0_a,Mdalfa0_a,'r^');legend('Teórico','Abaqus');

%Resultados da metodologia analítica, para dalfa0=0.001 rad.
dalfa0=linspace(0,0.001,500); %vector dalfa0
Mdalfa0_t=vpa(subs(Mc)); %vector M_t em função de dalfa0

%Importa os dados do momento e energia de deformação em função de dalfa0,
%obtidos no Abaqus, para dalfa0=0.001 rad.
ABQ_NB1=importdata('M_SE_da_0.001_comp_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_a=ABQ_NB1(:,3);
Mdalfa0_a=ABQ_NB1(:,1);

%Desenha os gráficos M-dalfa0, teóricos e obtidos na
%simulação por EF, para dalfa0=0.001 rad.
figure(3);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mdalfa0_t,'b-');
plot(dalfa0_a,Mdalfa0_a,'rs');
legend('Teórico','Abaqus');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Tubo Reto Equivalente, Comparação entre métodos numéricos e analíticos

%Resultados da metodologia analítica, para dalfa0=0.015 rad.
dalfa0=linspace(0,0.015,500); %vector dalfa0
Mcy1_t=vpa(subs(Mcyl));

%Importa os dados do momento em função de dalfa0, obtidos no Abaqus,
%para dalfa0=0.015 rad.
ABQ_RE15=importdata('M_SE_da_0.015_comp_RetoEq_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_REa=ABQ_RE15(:,3);
Mdalfa0_REa=ABQ_RE15(:,1);

%Desenha os gráficos M-dalfa0 teóricos e obtidos por EF, para dalfa0=0.015 rad.
figure(4);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mcy1_t,'b-');
plot(dalfa0_REa,Mdalfa0_REa,'r^');legend('Teórico','Abaqus');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Resultados da metodologia analítica, para dalfa0=0.001 rad.
dalfa0=linspace(0,0.001,500); %vector dalfa0
Mcy1_t=vpa(subs(Mcyl));

%Importa os dados do momento em função de dalfa0, obtidos no Abaqus,
%para dalfa0=0.001 rad.
ABQ_RE1=importdata('M_SE_da_0.001_comp_RetoEq_Abaqus.csv',';',0);
dalfa0_REa=ABQ_RE1(:,3);

```

```

Mdalfa0_REa=ABQ_RE1(:,1);

%Desenha os gráficos M-dalfa0 teóricos e obtidos por EF, para dalfa0=0.001 rad.
figure(5);
grid on
hold on
plot(dalfa0,Mcyl_t,'b-');
plot(dalfa0_REa,Mdalfa0_REa,'r^');legend('Teórico','Abaqus');
ylabel('Momento, M (Nm)');
xlabel('Deslocamento angular, dalfa_0 (rad) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% K EM FUNÇÃO DE PIPE FACTOR

%fator de flexibilidade da curva metálica
syms pf
K=(4800*(pf^4)+4136*(pf^2)+105)/((4800*(pf^4)+536*(pf^2)+3));

%vetor 'pipe factor'
pf=linspace(0,0.7,500);

%Gráficos do fator de flexibilidade teórico da curva segmentada compósita e metálica
%em função do 'pipe factor'
figure(6);
grid on; hold on;
axis([0 0.7 0 40]);
plot(pf,subs(K),'b-',pf,subs(Kc),'r-');
legend('Teórico (Metal)','Teórico (Compósito, 55°)')
ylabel('Fator de Flexibilidade, K');xlabel('Pipe factor, (t.Ro)/r^2');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

figure(7);
grid on; hold on;
axis([0 0.25 0 40]);
plot(pf,subs(K),'b-',pf,subs(Kc),'r-');

pf=(t*R0)/r^2; %pipe factor
dalfa0=0.001; %rad

%Fator de flexibilidade da curva compósita apenas com base nos momentos obtidos
%no Abaqus
Kc_abq=max(Mdalfa0_REa)/max(Mdalfa0_a);

%Fatores de Flexibilidade obtidos nas análises numérica e analítica da curva
%metálica
K=22.29;
K_abq=25.31;

figure(7);
plot(pf,K,'bs',pf,subs(Kc),'r^');
plot(pf,Kc_abq,'k+',pf,K_abq,'go','linewidth',2);
legend('Teórico (Metal)','Teórico (Compósito, 55°)','K_{Teórico} (Metal)',
'K_{Teórico} (Compósito, 55°)','K_{Abaqus} (Compósito, 55°)','K_{Abaqus} (Metal)');
ylabel('Fator de Flexibilidade, K');xlabel('Pipe factor, (t.Ro)/r^2');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Fator de Flexibilidade em Função do Ângulo de Enrolamento, Para Uma Curva Com a
%Mesma Geometria

%Parâmetros geométricos:
alfa0=pi/4; %radianos
lo=0.06; %m
alfaEQ=pi/12; %radianos (ângulo de segmentação)

```

```

R0=((lo/2)*cot(alfaEQ)); %m
t=0.0015; %m, espessura do tubo
r=0.04975; %raio médio fixo
pf=(t*R0)/r^2; %pipe factor
dalfa0=0.001; %radianos
WA=linspace(0,90,500); % vetor WA - winding angle (graus)

%Parâmetros do material:
E1=383000000000; %Pascal
E2=105600000000; %Pascal
nu12=0.29;
G12=39600000000; %Pascal

C=cosd(WA);
S=sind(WA);

Ex=((C.^4)/(E1))+((S.^4)/(E2))+((C.*S).^2)*((1/G12)-((2*nu12)/(E1)))).^(-1);
%Pascal
Et=((S.^4)/(E1))+((C.^4)/(E2))+((C.*S).^2)*((1/G12)-((2*nu12)/(E1)))).^(-1);
%Pascal
nuxt=((((C.^4)+(S.^4))*(nu12/E1))-((C.*S).^2)*((1/E1)+(1/E2)-(1/G12)))/
(((C.^4)/(E1))+((S.^4)/(E2))+((C.*S).^2)*((1/G12)-((2*nu12)/(E1))))); %Pascal
Gxt=(4*(C.*S).^2*((1/E1)+(1/E2)+2*(nu12/E1))+((C.^2-S.^2).^2/G12)).^(-1); %Pascal

K_wa=vpa(subs(Kc));

%Desenha o gráfico K-WA
figure(8);
grid on
hold on
plot(WA,K_wa,'b-');
legend('Teórico (Compósito)')
ylabel('Fator de Flexibilidade, K');
xlabel('Ângulo de Enrolamento, phi (graus) ');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

```




Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos da Curva Segmentada Compósita

```
*Heading
** Job name: Negative_Bending_analysis Model name: Mitred Bend Comp
** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name="Mitred Bend Composite"
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name="Mitred Bend Composite-1", part="Mitred Bend Composite"
*Node
1, 0.229821533, 0.0542019159, 0.
2, 0.221587971, 0.068462871, 0.
3, 0.171087965, 0.0549314357, 0.0505000018
4, 0.120587975, 0.0414000005, 0.
5, 0.142352968, 0.0037019141, 0.
6, 0.221587971, 0.101397134, 0.
7, 0.171087965, 0.114928566, 0.0505000018
8, 0.120587975, 0.128460005, 0.
9, 0.23805511, 0.129919037, 0.
10, 0.201086536, 0.166887611, 0.0505000018
11, 0.164117977, 0.20385617, 0.
12, 0.252316058, 0.138152599, 0.
13, 0.201086536, 0.166887611, -0.0505000018
14, 0.201816052, 0.225621179, 0.
15, 0.171087965, 0.0549314357, -0.0505000018
16, 0.171087965, 0.114928566, -0.0505000018
17, 0.20648618, 0.0644163564, 0.0360169001
18, 0.135689765, 0.0454465151, 0.0360169001
19, 0.155162454, 0.0110974675, 0.0357088931
20, 0.186087251, 0.028951915, 0.0505000018
```

21, 0.217012063, 0.0468063615, 0.0357088931
 22, 0.221587971, 0.0849300027, 0.
 23, 0.20648618, 0.105443649, 0.0360169001
 24, 0.135689765, 0.124413483, 0.0360169001
 25, 0.120587975, 0.0849300027, 0.
 26, 0.229821533, 0.11565809, 0.
 27, 0.226999819, 0.140974328, 0.0360169001
 28, 0.175173253, 0.192800894, 0.0360169001
 29, 0.142352968, 0.16615808, 0.
 30, 0.226999819, 0.140974328, -0.0360169001
 31, 0.175173253, 0.192800894, -0.0360169001
 32, 0.209211618, 0.212811694, -0.0357088931
 33, 0.227066055, 0.181886882, -0.0505000018
 34, 0.244920507, 0.150962085, -0.0357088931
 35, 0.20648618, 0.0644163564, -0.0360169001
 36, 0.135689765, 0.0454465151, -0.0360169001
 37, 0.20648618, 0.105443649, -0.0360169001
 38, 0.135689765, 0.124413483, -0.0360169001
 39, 0.217012063, 0.0468063615, -0.0357088931
 40, 0.186087251, 0.028951915, -0.0505000018
 41, 0.155162454, 0.0110974675, -0.0357088931
 42, 0.244920507, 0.150962085, 0.0357088931
 43, 0.227066055, 0.181886882, 0.0505000018
 44, 0.209211618, 0.212811694, 0.0357088931
 45, 0.20648618, 0.0849300027, 0.0360169001
 46, 0.171087965, 0.0849300027, 0.0505000018
 47, 0.135689765, 0.0849300027, 0.0360169001
 48, 0.216742992, 0.123208985, 0.0360169038
 49, 0.186087251, 0.140908092, 0.0505000018
 50, 0.155431509, 0.158607185, 0.0360169001
 51, 0.20648618, 0.0849300027, -0.0360169001
 52, 0.171087965, 0.0849300027, -0.0505000018
 53, 0.135689765, 0.0849300027, -0.0360169001
 54, 0.216742992, 0.123208985, -0.0360169038
 55, 0.186087251, 0.140908092, -0.0505000018
 56, 0.155431509, 0.158607185, -0.0360169001
 57, 0.225704759, 0.0613323897, 0.
 58, 0.217659742, 0.0674103051, 0.0195274241
 59, 0.211749405, 0.0556115247, 0.0358632319
 60, 0.226492465, 0.052279871, 0.0193255134
 61, 0.190211207, 0.0600554906, 0.0467391871
 62, 0.178587615, 0.0419416763, 0.0505000018
 63, 0.202823639, 0.0386146717, 0.0466559157
 64, 0.151964739, 0.0498073772, 0.0467391871
 65, 0.145425826, 0.0282718241, 0.0358632356
 66, 0.169350863, 0.0192891583, 0.0466559157
 67, 0.124516204, 0.0424525663, 0.0195274241
 68, 0.131470472, 0.0225509573, 0.
 69, 0.145682052, 0.00562395621, 0.0193255153
 70, 0.221587971, 0.0766964331, 0.
 71, 0.217659742, 0.0849300027, 0.0195274241
 72, 0.20648618, 0.0746731758, 0.0360169001
 73, 0.221587971, 0.0931635648, 0.
 74, 0.217659742, 0.1024497, 0.0195274241
 75, 0.20648618, 0.0951868296, 0.0360169001
 76, 0.190211207, 0.0849300027, 0.0467391908
 77, 0.171087965, 0.0699307173, 0.0505000018
 78, 0.190211207, 0.109804511, 0.0467391871
 79, 0.171087965, 0.099929288, 0.0505000018
 80, 0.151964724, 0.0849300027, 0.0467391834
 81, 0.135689765, 0.0651882589, 0.0360169001
 82, 0.151964739, 0.120052621, 0.0467391871
 83, 0.135689765, 0.104671746, 0.0360169001

84,	0.124516204,	0.0849300027,	0.019527426
85,	0.120587975,	0.0631650016,	0.
86,	0.124516204,	0.127407432,	0.0195274241
87,	0.120587975,	0.106695004,	0.
88,	0.225704759,	0.108527608,	0.
89,	0.226419583,	0.117622204,	0.0195274297
90,	0.211614579,	0.114326313,	0.0360169038
91,	0.233938321,	0.122788563,	0.
92,	0.235179439,	0.132794708,	0.0195274279
93,	0.221871406,	0.132091656,	0.0360169038
94,	0.202648461,	0.131346464,	0.0467391908
95,	0.178587615,	0.127918333,	0.0505000018
96,	0.215085715,	0.152888432,	0.0467391908
97,	0.193586886,	0.153897852,	0.0505000018
98,	0.169526041,	0.150469705,	0.0467391871
99,	0.145560637,	0.141510338,	0.0360169001
100,	0.187087357,	0.18088679,	0.0467391871
101,	0.165302381,	0.175704032,	0.0360169001
102,	0.145754918,	0.164193973,	0.0195274241
103,	0.131470472,	0.147309035,	0.
104,	0.166993633,	0.200980514,	0.0195274241
105,	0.153235465,	0.185007125,	0.
106,	0.245185584,	0.134035826,	0.
107,	0.235179439,	0.132794708,	-0.0195274279
108,	0.23596032,	0.145967916,	-0.0358632356
109,	0.250394017,	0.141481683,	-0.0193255134
110,	0.215085715,	0.152888432,	-0.0467391908
111,	0.214076295,	0.174387246,	-0.0505000018
112,	0.236728817,	0.165150508,	-0.0466559157
113,	0.187087357,	0.18088679,	-0.0467391871
114,	0.192192271,	0.202806577,	-0.0358632319
115,	0.217403308,	0.19862327,	-0.0466559194
116,	0.166993633,	0.200980514,	-0.0195274241
117,	0.182967022,	0.214738667,	0.
118,	0.203738093,	0.222292095,	-0.0193255153
119,	0.217659742,	0.0849300027,	-0.0195274241
120,	0.20648618,	0.0951868296,	-0.0360169001
121,	0.217659742,	0.1024497,	-0.0195274241
122,	0.217659742,	0.0674103051,	-0.0195274241
123,	0.20648618,	0.0746731758,	-0.0360169001
124,	0.190211207,	0.0849300027,	-0.0467391908
125,	0.171087965,	0.099929288,	-0.0505000018
126,	0.190211207,	0.109804511,	-0.0467391871
127,	0.190211207,	0.0600554906,	-0.0467391871
128,	0.171087965,	0.0699307173,	-0.0505000018
129,	0.151964724,	0.0849300027,	-0.0467391834
130,	0.135689765,	0.104671746,	-0.0360169001
131,	0.151964739,	0.120052621,	-0.0467391871
132,	0.151964739,	0.0498073772,	-0.0467391871
133,	0.135689765,	0.0651882589,	-0.0360169001
134,	0.124516204,	0.0849300027,	-0.019527426
135,	0.124516204,	0.127407432,	-0.0195274241
136,	0.124516204,	0.0424525663,	-0.0195274241
137,	0.226492465,	0.052279871,	-0.0193255134
138,	0.211749405,	0.0556115247,	-0.0358632319
139,	0.202823639,	0.0386146717,	-0.0466559157
140,	0.178587615,	0.0419416763,	-0.0505000018
141,	0.169350863,	0.0192891583,	-0.0466559157
142,	0.145425826,	0.0282718241,	-0.0358632356
143,	0.145682052,	0.00562395621,	-0.0193255153
144,	0.250394017,	0.141481683,	0.0193255134
145,	0.23596032,	0.145967916,	0.0358632356
146,	0.236728817,	0.165150508,	0.0466559157

```

147, 0.214076295, 0.174387246, 0.0505000018
148, 0.217403308, 0.19862327, 0.0466559194
149, 0.192192271, 0.202806577, 0.0358632319
150, 0.203738093, 0.222292095, 0.0193255153
151, 0.226419583, 0.117622204, -0.0195274297
152, 0.221871406, 0.132091656, -0.0360169038
153, 0.211614579, 0.114326313, -0.0360169038
154, 0.202648461, 0.131346464, -0.0467391908
155, 0.193586886, 0.153897852, -0.0505000018
156, 0.178587615, 0.127918333, -0.0505000018
157, 0.169526041, 0.150469705, -0.0467391871
158, 0.165302381, 0.175704032, -0.0360169001
159, 0.145560637, 0.141510338, -0.0360169001
160, 0.145754918, 0.164193973, -0.0195274241
*Element, type=S8R
1, 1, 2, 17, 21, 57, 58, 59, 60
2, 21, 17, 3, 20, 59, 61, 62, 63
3, 20, 3, 18, 19, 62, 64, 65, 66
4, 19, 18, 4, 5, 65, 67, 68, 69
5, 2, 22, 45, 17, 70, 71, 72, 58
6, 22, 6, 23, 45, 73, 74, 75, 71
7, 17, 45, 46, 3, 72, 76, 77, 61
8, 45, 23, 7, 46, 75, 78, 79, 76
9, 3, 46, 47, 18, 77, 80, 81, 64
10, 46, 7, 24, 47, 79, 82, 83, 80
11, 18, 47, 25, 4, 81, 84, 85, 67
12, 47, 24, 8, 25, 83, 86, 87, 84
13, 6, 26, 48, 23, 88, 89, 90, 74
14, 26, 9, 27, 48, 91, 92, 93, 89
15, 23, 48, 49, 7, 90, 94, 95, 78
16, 48, 27, 10, 49, 93, 96, 97, 94
17, 7, 49, 50, 24, 95, 98, 99, 82
18, 49, 10, 28, 50, 97, 100, 101, 98
19, 24, 50, 29, 8, 99, 102, 103, 86
20, 50, 28, 11, 29, 101, 104, 105, 102
21, 12, 9, 30, 34, 106, 107, 108, 109
22, 34, 30, 13, 33, 108, 110, 111, 112
23, 33, 13, 31, 32, 111, 113, 114, 115
24, 32, 31, 11, 14, 114, 116, 117, 118
25, 6, 22, 51, 37, 73, 119, 120, 121
26, 22, 2, 35, 51, 70, 122, 123, 119
27, 37, 51, 52, 16, 120, 124, 125, 126
28, 51, 35, 15, 52, 123, 127, 128, 124
29, 16, 52, 53, 38, 125, 129, 130, 131
30, 52, 15, 36, 53, 128, 132, 133, 129
31, 38, 53, 25, 8, 130, 134, 87, 135
32, 53, 36, 4, 25, 133, 136, 85, 134
33, 2, 1, 39, 35, 57, 137, 138, 122
34, 35, 39, 40, 15, 138, 139, 140, 127
35, 15, 40, 41, 36, 140, 141, 142, 132
36, 36, 41, 5, 4, 142, 143, 68, 136
37, 9, 12, 42, 27, 106, 144, 145, 92
38, 27, 42, 43, 10, 145, 146, 147, 96
39, 10, 43, 44, 28, 147, 148, 149, 100
40, 28, 44, 14, 11, 149, 150, 117, 104
41, 9, 26, 54, 30, 91, 151, 152, 107
42, 26, 6, 37, 54, 88, 121, 153, 151
43, 30, 54, 55, 13, 152, 154, 155, 110
44, 54, 37, 16, 55, 153, 126, 156, 154
45, 13, 55, 56, 31, 155, 157, 158, 113
46, 55, 16, 38, 56, 156, 131, 159, 157
47, 31, 56, 29, 11, 158, 160, 105, 116
48, 56, 38, 8, 29, 159, 135, 103, 160

```

```

*Nset, nset=_PickedSet235, internal
  4, 5, 8, 11, 14, 25, 29, 68, 85, 87, 103, 105, 117
*Elset, elset=_PickedSet235, internal
  4, 11, 12, 19, 20, 24, 31, 32, 36, 40, 47, 48
*Elset, elset=__PickedSurf234_SPOS, internal, generate
  1, 48, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf234, internal
__PickedSurf234_SPOS, SPOS
*Distribution, name=Ori-1-DiscOrient, location=ELEMENT, Table=Ori-1-DiscOrient_Table
** Description: Distribution generated from Discrete Orientation
, 1., 0., 0., 0., 1., 0.
1, -0.5, 0.866025388240814, 2.3648284730252e-17, -0.333144932985306, -0.192341312766075,
2, -0.5, 0.866025388240814, -2.16434950560827e-17, -0.800819456577301, -0.462353318929672,
3, -0.5, 0.866025388240814, -4.02227987946363e-18, -0.800819337368011, -0.462353229522705,
4, -0.5, 0.866025388240814, 0., -0.333144932985306, -0.192341327667236, -0.92304,
33, -0.5, 0.866025388240814, 0., 0.333144843578339, 0.192341268062592, 0.923048,
34, -0.5, 0.866025388240814, 0., 0.800819396972656, 0.46235328912735, 0.3806806,
35, -0.5, 0.866025388240814, -2.16434884386378e-17, 0.800819396972656, 0.46235328912735,
36, -0.5, 0.866025388240814, 2.3648284730252e-17, 0.333144932985306, 0.192341327667236, -
5, -1.19173259154913e-17, 1., 2.8422124370669e-17, -0.386681705713272, -3.08194724568,
6, -1.19173259154913e-17, 1., 2.8422124370669e-17, -0.386681705713272, -3.08194724568,
7, -6.82733437079792e-17, 1., 2.79338892859157e-17, -0.925528526306152,
-7.37668751490704e-17, 0.37867796421051
8, -6.82733437079792e-17, 1., 2.79338892859157e-17, -0.925528526306152,
-7.37668751490704e-17, 0.37867796421051
9, -6.82733503254241e-17, 1., -2.79338859771933e-17, -0.925528526306152,
-7.37668751490704e-17, -0.378677904605865
10, -6.82733503254241e-17, 1., -2.79338859771933e-17, -0.925528526306152,
-7.37668751490704e-17, -0.378677904605865
11, -1.19173259154913e-17, 1., -2.8422124370669e-17, -0.386681705713272,
-3.081947245686e-17, -0.9222132563591
12, -1.19173259154913e-17, 1., -2.8422124370669e-17, -0.386681705713272,
-3.081947245686e-17, -0.9222132563591
25, -1.19173259154913e-17, 1., -2.8422124370669e-17, 0.386681705713272,
3.081947245686e-17, 0.9222132563591
26, -1.19173259154913e-17, 1., -2.8422124370669e-17, 0.386681705713272,
3.081947245686e-17, 0.9222132563591
27, -6.82733437079792e-17, 1., -2.79338892859157e-17, 0.925528526306152,
7.37668751490704e-17, 0.37867796421051
28, -6.82733437079792e-17, 1., -2.79338892859157e-17, 0.925528526306152,
7.37668751490704e-17, 0.37867796421051
29, -6.82733503254241e-17, 1., 2.79338859771933e-17, 0.925528526306152,
7.37668751490704e-17, -0.378677904605865
30, -6.82733503254241e-17, 1., 2.79338859771933e-17, 0.925528526306152,
7.37668751490704e-17, -0.378677904605865
31, -1.19173259154913e-17, 1., 2.8422124370669e-17, 0.386681705713272, 3.08194724568,
32, -1.19173259154913e-17, 1., 2.8422124370669e-17, 0.386681705713272, 3.08194724568,
13, 0.5, 0.866025388240814, 2.14651466442102e-17, -0.334876179695129, 0.193340852856636,
14, 0.5, 0.866025388240814, 0., -0.334876269102097, 0.193340912461281, 0.922213,
15, 0.5, 0.866025388240814, -2.56885786506732e-17, -0.801531255245209, 0.462764292955399,
16, 0.5, 0.866025388240814, -2.56885786506732e-17, -0.801531314849854, 0.462764292955399,
17, 0.5, 0.866025388240814, -2.96686425403946e-17, -0.801531195640564, 0.462764263153076,
18, 0.5, 0.866025388240814, -2.96686425403946e-17, -0.801531136035919, 0.462764233350754,
19, 0.5, 0.866025388240814, 2.14034141550953e-18, -0.334876149892807, 0.193340837955475,
20, 0.5, 0.866025388240814, 2.14651416811265e-17, -0.334876120090485, 0.193340808153152,
41, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.334876269102097, -0.193340912461281, 0.922213,
42, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.334876209497452, -0.193340867757797, 0.922213,
43, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.801531314849854, -0.462764292955399, 0.378677,
44, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.801531314849854, -0.462764322757721, 0.378677,
45, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.801531136035919, -0.462764233350754, -0.37867,
46, 0.5, 0.866025388240814, 2.96686425403946e-17, 0.801531195640564, -0.462764263153076,
47, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.334876209497452, -0.193340867757797, -0.92221,
48, 0.5, 0.866025388240814, 0., 0.334876149892807, -0.193340837955475, -0.92221

```

```

21, -0.866025388240814, -0.5, 2.13541737475913e-17, -0.192341297864914, 0.333144903182983,
22, -0.866025388240814, -0.5, 5.53538016264155e-17, -0.46235328912735, 0.800819396972656,
23, -0.866025388240814, -0.5, -4.02227987946363e-18, -0.462353259325027, 0.80081933736801,
24, -0.866025388240814, -0.5, 2.13541754019525e-17, -0.192341312766075, 0.33314493298530,
37, -0.866025388240814, -0.5, 0., 0.192341297864914, -0.333144903182983, -0.923,
38, -0.866025388240814, -0.5, 0., 0.46235328912735, -0.800819396972656, -0.3806,
39, -0.866025388240814, -0.5, 2.56657633550178e-17, 0.46235328912735, -0.800819337368011,
40, -0.866025388240814, -0.5, 4.50024601322045e-17, 0.192341312766075, -0.33314493298530,
*Orientation, name=Ori-1, system=RECTANGULAR
Ori-1-DiscOrient
3, 0.
** Region: (CompositeLayup-1: Generated From Layup)
*Elset, elset=CompositeLayup-1
1, 2, 3, 4, 33, 34, 35, 36
** Section: CompositeLayup-1
*Shell Section, elset=CompositeLayup-1, composite, orientation=Ori-1, layup=CompositeLayup
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-1
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-4
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-5
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-6
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-7
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-8
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-9
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-10
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-11
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-12
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-13
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-14
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-15
*Orientation, name=Ori-2, system=RECTANGULAR
Ori-1-DiscOrient
3, 0.
** Region: (CompositeLayup-2: Generated From Layup)
*Elset, elset=CompositeLayup-2
5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
** Section: CompositeLayup-2
*Shell Section, elset=CompositeLayup-2, composite, orientation=Ori-2, layup=CompositeLayup
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-1-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-2-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-3-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-4-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-5-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-6-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-7-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-8-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-9-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-10-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-11-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-12-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-13-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-14-Copy3
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-15-Copy3
*Orientation, name=Ori-3, system=RECTANGULAR
Ori-1-DiscOrient
3, 0.
** Region: (CompositeLayup-3: Generated From Layup)
*Elset, elset=CompositeLayup-3
13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
** Section: CompositeLayup-3
*Shell Section, elset=CompositeLayup-3, composite, orientation=Ori-3, layup=CompositeLayup
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-1-Copy2

```

```

0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-2-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-3-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-4-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-5-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-6-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-7-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-8-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-9-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-10-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-11-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-12-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-13-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, -55., Ply-14-Copy2
0.0001, 5, E-Glass/E, 55., Ply-15-Copy2
*Orientation, name=Ori-4, system=RECTANGULAR
Ori-1-DiscOrient
3, 0.
** Region: (CompositeLayup-4: Generated From Layup)
*Elset, elset=CompositeLayup-4
21, 22, 23, 24, 37, 38, 39, 40
** Section: CompositeLayup-4
*Shell Section, elset=CompositeLayup-4, composite, orientation=Ori-4, layup=CompositeLayup
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-1-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-2-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-3-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-4-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-5-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-6-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-7-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-8-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-9-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-10-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-11-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-12-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-13-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 125., Ply-14-Copy1
0.0001, 5, E-Glass/E, 235., Ply-15-Copy1
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name="Mitred Bend Composite-1", part="Mitred Bend Composite"
*End Instance
**
*Node
1, 0.185000002, 0.0280000009, 0.
*Node
2, 0.226999998, 0.182999998, 0.
*Nset, nset=_PickedSet22, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet23, internal
1,
*Nset, nset=RP1
1,
*Nset, nset=RP2
2,
*Nset, nset=_PickedSet152, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet153, internal
1,

```

```

*Nset, nset=_PickedSet154, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet157, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet167, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet169, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet170, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet171, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet172, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet228, internal, instance="Mitred Bend Composite-1"
1, 2, 4, 5, 57, 68
*Elset, elset=_PickedSet228, internal, instance="Mitred Bend Composite-1"
1, 4, 33, 36
*Nset, nset=_PickedSet229, internal, instance="Mitred Bend Composite-1"
9, 11, 12, 14, 106, 117
*Elset, elset=_PickedSet229, internal, instance="Mitred Bend Composite-1"
21, 24, 37, 40
*Nset, nset=_PickedSet233, internal
2,
*Nset, nset="BC 1_2", instance="Mitred Bend Composite-1"
22, 25, 70, 73, 85, 87
*Nset, nset="BC 1_3", instance="Mitred Bend Composite-1"
26, 29, 88, 91, 103, 105
*Nset, nset="bottom hS1", instance="Mitred Bend Composite-1"
1, 5, 19, 20, 21, 39, 40, 41, 60, 63, 66, 69, 137, 139, 141, 143
*Nset, nset="bottom - pivot", instance="Mitred Bend Composite-1"
19, 20, 21, 39, 40, 41, 60, 63, 66, 69, 137, 139, 141, 143
*Nset, nset="bottom pivot", instance="Mitred Bend Composite-1"
1, 5
*Nset, nset="top hS2", instance="Mitred Bend Composite-1"
12, 14, 32, 33, 34, 42, 43, 44, 109, 112, 115, 118, 144, 146, 148, 150
*Nset, nset="top - pivot", instance="Mitred Bend Composite-1"
32, 33, 34, 42, 43, 44, 109, 112, 115, 118, 144, 146, 148, 150
*Nset, nset="top pivot", instance="Mitred Bend Composite-1"
12, 14
*Nset, nset="symm x", instance="Mitred Bend Composite-1"
7, 16, 23, 24, 37, 38, 74, 78, 82, 86, 121, 126, 131, 135
*Nset, nset="symm x pivot", instance="Mitred Bend Composite-1"
6, 8
*Surface, type=NODE, name="bottom hS1_CNS_", internal
"bottom hS1", 1.
*Surface, type=NODE, name="top hS2_CNS_", internal
"top hS2", 1.
*Surface, type=NODE, name="bottom pivot_CNS_", internal
"bottom pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="top pivot_CNS_", internal
"top pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="bottom - pivot_CNS_", internal
"bottom - pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="top - pivot_CNS_", internal
"top - pivot", 1.
*Nset, nset="_T-Datum csys-2", internal
"symm x pivot",
"symm x",
*Transform, nset="_T-Datum csys-2"
0., 0., -1., -0.965925826289068, 0.258819045102521,
0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-3", internal

```



```

_PickedSet228,
_PickedSet170,
_PickedSet171,
_PickedSet172,
_PickedSet23,
*Transform, nset="_T-Datum csys-3"
    -0.5, 0.866025403784439,      0., -0.866025403784439,      -0.5,
0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-5", internal
"BC 1_3",
*Transform, nset="_T-Datum csys-5"
    0.5, 0.866025403784439,      0., -0.866025403784439,      0.5,
0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-1", internal
_PickedSet229,
_PickedSet167,
_PickedSet233,
_PickedSet169,
_PickedSet22,
*Transform, nset="_T-Datum csys-1"
-0.866025403784438,      -0.5, 4.51689601823763e-16,      -0.5, 0.866025403784438,
0.
*Nset, nset="_T-Datum csys-4", internal
"BC 1_2",
*Transform, nset="_T-Datum csys-4"
4.62615043284366e-16,      1., -3.09238100610693e-16,      -1., 4.62615043284366e-16,
0.
*Orientation, name="Datum csys-3"
    -0.5, 0.866025403784439,      0., -0.866025403784439,      -0.5,
0.
1, 0.
*Orientation, name="Datum csys-1"
-0.866025403784438,      -0.5, 4.51689601823763e-16,      -0.5, 0.866025403784438,
0.
1, 0.
** Constraint: Dcoup_1
*Coupling, constraint name=Dcoup_1, ref node=_PickedSet153, surface="bottom hS1_CNS_", orientation=
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Dcoup_2
*Coupling, constraint name=Dcoup_2, ref node=_PickedSet152, surface="top hS2_CNS_", orientation="D
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Kcoup 1_1
*Coupling, constraint name="Kcoup 1_1", ref node=_PickedSet157, surface="bottom pivot_CNS_", orien
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup 1_2
*Coupling, constraint name="Kcoup 1_2", ref node=_PickedSet154, surface="top pivot_CNS_", orientat
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup 2_1
*Coupling, constraint name="Kcoup 2_1", ref node=RP1, surface="bottom - pivot_CNS_", orientation=
*Kinematic
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup 2_2

```

```

*Coupling, constraint name="Kcoup 2_2", ref node=RP2, surface="top - pivot_CNS_", orientation="Dat
*Kinematic
5, 5
6, 6
*End Assembly
*Distribution Table, name=Ori-1-DiscOrient_Table
coord3D, coord3D
**
** MATERIALS
**
*Material, name=E-Glass/E
*Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
3.83e+10, 1.056e+10, 1.056e+10, 0.29, 0.29, 0.42, 3.96e+09, 3.96e+09
2.45e+09,
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1,2 P Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"symm x pivot", 1, 1
"symm x pivot", 3, 3
"symm x pivot", 4, 4
"symm x pivot", 5, 5
"symm x pivot", 6, 6
** Name: BC-1_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet228, 3, 3
_PickedSet228, 4, 4
_PickedSet228, 5, 5
** Name: BC-1_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 1_2", 3, 3
"BC 1_2", 4, 4
"BC 1_2", 5, 5
** Name: BC-1_3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 1_3", 3, 3
"BC 1_3", 4, 4
"BC 1_3", 5, 5
** Name: BC-1_4 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet229, 3, 3
_PickedSet229, 4, 4
_PickedSet229, 5, 5
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"symm x", 3, 3
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"symm x", 4, 4
"symm x", 5, 5
** Name: BC-4_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet170, 4, 4
_PickedSet170, 5, 5
** Name: BC-4_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet167, 4, 4
_PickedSet167, 5, 5
** Name: BC-5_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet171, 2, 2
_PickedSet171, 3, 3

```

```

** Name: BC-5_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet233, 2, 2
_PickedSet233, 3, 3
** Name: BC-6_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet172, 2, 2
** Name: BC-6_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet169, 2, 2
**
**
** STEP: Angular load
**
*Step, name="Angular load", nlgeom=YES
*Static
0.05, 1., 1e-05, 0.1
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: angular load 1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet23, 6, 6, -0.001
** Name: angular load 2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet22, 6, 6, -0.001
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
RF, U, UR
*Element Output, directions=YES
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
81, 82, 83, 84, 85
E, EE, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history
*Energy Output
ALLSE,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**

```

```
*Node Output, nset=RP1
RF1, RF2, RF3, RM1, RM2, RM3, U1, U2
U3, UR1, UR2, UR3
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
**
*Node Output, nset=RP2
RF1, RF2, RF3, RM1, RM2, RM3, U1, U2
U3, UR1, UR2, UR3
*End Step
```



Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos do Tubo Reto Equivalente Compósito

```
*Heading
** Job name: Equivalent_cyl__analysis Model name: Tubo Eq Comp
** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=EqCompositeCyl
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=EqSteelCyl-1, part=EqCompositeCyl
*Node
    1,          0., 0.0712499991, -0.0505000018
    2,          0., -0.0167500004, -0.0505000018
    3, -0.0505000018, -0.0167500004,          0.
    4, -0.0505000018, 0.0712499991,          0.
    5,          0., -0.0167500004, 0.0505000018
    6,          0., 0.0712499991, 0.0505000018
    7,          0., 0.1592500006, -0.0505000018
    8, -0.0505000018, 0.1592500006,          0.
    9,          0., 0.1592500006, 0.0505000018
   10,          0., 0.0272499993, -0.0505000018
   11, -0.0357088931, -0.0167500004, -0.0357088931
   12, -0.0505000018, 0.0272499993,          0.
   13, -0.0357088931, 0.0712499991, -0.0357088931
   14,          0., 0.0272499993, 0.0505000018
   15, -0.0357088931, 0.0712499991, 0.0357088931
   16, -0.0357088931, -0.0167500004, 0.0357088931
   17,          0., 0.115249999, -0.0505000018
   18, -0.0505000018, 0.115249999,          0.
```

19, -0.0357088931, 0.159250006, -0.0357088931
 20, 0., 0.115249999, 0.0505000018
 21, -0.0357088931, 0.159250006, 0.0357088931
 22, 0.0357088931, 0.0712499991, 0.0357088931
 23, 0.0505000018, 0.0712499991, 0.
 24, 0.0357088931, 0.0712499991, -0.0357088931
 25, 0.0357088931, 0.159250006, -0.0357088931
 26, 0.0505000018, 0.159250006, 0.
 27, 0.0357088931, 0.159250006, 0.0357088931
 28, 0.0357088931, -0.0167500004, 0.0357088931
 29, 0.0505000018, -0.0167500004, 0.
 30, 0.0357088931, -0.0167500004, -0.0357088931
 31, -0.0357088931, 0.0272499993, -0.0357088931
 32, -0.0357088931, 0.0272499993, 0.0357088931
 33, -0.0357088931, 0.115249999, -0.0357088931
 34, -0.0357088931, 0.115249999, 0.0357088931
 35, 0.0357088931, 0.115249999, 0.0357088931
 36, 0.0505000018, 0.115249999, 0.
 37, 0.0357088931, 0.115249999, -0.0357088931
 38, 0.0357088931, 0.0272499993, 0.0357088931
 39, 0.0505000018, 0.0272499993, 0.
 40, 0.0357088931, 0.0272499993, -0.0357088931
 41, 0., 0.0492499992, -0.0505000018
 42, -0.0193255134, 0.0272499993, -0.0466559157
 43, -0.0357088931, 0.0492499992, -0.0357088931
 44, -0.0193255134, 0.0712499991, -0.0466559157
 45, 0., 0.00524999946, -0.0505000018
 46, -0.0193255134, -0.0167500004, -0.0466559157
 47, -0.0357088931, 0.00524999946, -0.0357088931
 48, -0.0466559157, 0.0272499993, -0.0193255134
 49, -0.0505000018, 0.0492499992, 0.
 50, -0.0466559157, 0.0712499991, -0.0193255134
 51, -0.0466559157, -0.0167500004, -0.0193255134
 52, -0.0505000018, 0.00524999946, 0.
 53, 0., 0.00524999946, 0.0505000018
 54, -0.0193255134, 0.0272499993, 0.0466559157
 55, -0.0357088931, 0.00524999946, 0.0357088931
 56, -0.0193255134, -0.0167500004, 0.0466559157
 57, 0., 0.0492499992, 0.0505000018
 58, -0.0193255134, 0.0712499991, 0.0466559157
 59, -0.0357088931, 0.0492499992, 0.0357088931
 60, -0.0466559157, 0.0272499993, 0.0193255134
 61, -0.0466559157, -0.0167500004, 0.0193255134
 62, -0.0466559157, 0.0712499991, 0.0193255134
 63, 0., 0.137250006, -0.0505000018
 64, -0.0193255134, 0.115249999, -0.0466559157
 65, -0.0357088931, 0.137250006, -0.0357088931
 66, -0.0193255134, 0.159250006, -0.0466559157
 67, 0., 0.093249999, -0.0505000018
 68, -0.0357088931, 0.093249999, -0.0357088931
 69, -0.0466559157, 0.115249999, -0.0193255134
 70, -0.0505000018, 0.137250006, 0.
 71, -0.0466559157, 0.159250006, -0.0193255134
 72, -0.0505000018, 0.093249999, 0.
 73, 0., 0.093249999, 0.0505000018
 74, -0.0193255134, 0.115249999, 0.0466559157
 75, -0.0357088931, 0.093249999, 0.0357088931
 76, 0., 0.137250006, 0.0505000018
 77, -0.0193255134, 0.159250006, 0.0466559157
 78, -0.0357088931, 0.137250006, 0.0357088931
 79, -0.0466559157, 0.115249999, 0.0193255134
 80, -0.0466559157, 0.159250006, 0.0193255134
 81, 0.0193255134, 0.115249999, 0.0466559157

```

82, 0.0357088931, 0.137250006, 0.0357088931
83, 0.0193255134, 0.159250006, 0.0466559157
84, 0.0193255134, 0.0712499991, 0.0466559157
85, 0.0357088931, 0.093249999, 0.0357088931
86, 0.0466559157, 0.115249999, 0.0193255134
87, 0.0505000018, 0.137250006, 0.
88, 0.0466559157, 0.159250006, 0.0193255134
89, 0.0466559157, 0.0712499991, 0.0193255134
90, 0.0505000018, 0.093249999, 0.
91, 0.0466559157, 0.115249999, -0.0193255134
92, 0.0357088931, 0.137250006, -0.0357088931
93, 0.0466559157, 0.159250006, -0.0193255134
94, 0.0466559157, 0.0712499991, -0.0193255134
95, 0.0357088931, 0.093249999, -0.0357088931
96, 0.0193255134, 0.115249999, -0.0466559157
97, 0.0193255134, 0.159250006, -0.0466559157
98, 0.0193255134, 0.0712499991, -0.0466559157
99, 0.0193255134, 0.0272499993, 0.0466559157
100, 0.0357088931, 0.0492499992, 0.0357088931
101, 0.0193255134, -0.0167500004, 0.0466559157
102, 0.0357088931, 0.00524999946, 0.0357088931
103, 0.0466559157, 0.0272499993, 0.0193255134
104, 0.0505000018, 0.0492499992, 0.
105, 0.0466559157, -0.0167500004, 0.0193255134
106, 0.0505000018, 0.00524999946, 0.
107, 0.0466559157, 0.0272499993, -0.0193255134
108, 0.0357088931, 0.0492499992, -0.0357088931
109, 0.0466559157, -0.0167500004, -0.0193255134
110, 0.0357088931, 0.00524999946, -0.0357088931
111, 0.0193255134, 0.0272499993, -0.0466559157
112, 0.0193255134, -0.0167500004, -0.0466559157
*Element, type=S8R
1, 1, 10, 31, 13, 41, 42, 43, 44
2, 10, 2, 11, 31, 45, 46, 47, 42
3, 13, 31, 12, 4, 43, 48, 49, 50
4, 31, 11, 3, 12, 47, 51, 52, 48
5, 5, 14, 32, 16, 53, 54, 55, 56
6, 14, 6, 15, 32, 57, 58, 59, 54
7, 16, 32, 12, 3, 55, 60, 52, 61
8, 32, 15, 4, 12, 59, 62, 49, 60
9, 7, 17, 33, 19, 63, 64, 65, 66
10, 17, 1, 13, 33, 67, 44, 68, 64
11, 19, 33, 18, 8, 65, 69, 70, 71
12, 33, 13, 4, 18, 68, 50, 72, 69
13, 6, 20, 34, 15, 73, 74, 75, 58
14, 20, 9, 21, 34, 76, 77, 78, 74
15, 15, 34, 18, 4, 75, 79, 72, 62
16, 34, 21, 8, 18, 78, 80, 70, 79
17, 9, 20, 35, 27, 76, 81, 82, 83
18, 20, 6, 22, 35, 73, 84, 85, 81
19, 27, 35, 36, 26, 82, 86, 87, 88
20, 35, 22, 23, 36, 85, 89, 90, 86
21, 26, 36, 37, 25, 87, 91, 92, 93
22, 36, 23, 24, 37, 90, 94, 95, 91
23, 25, 37, 17, 7, 92, 96, 63, 97
24, 37, 24, 1, 17, 95, 98, 67, 96
25, 6, 14, 38, 22, 57, 99, 100, 84
26, 14, 5, 28, 38, 53, 101, 102, 99
27, 22, 38, 39, 23, 100, 103, 104, 89
28, 38, 28, 29, 39, 102, 105, 106, 103
29, 23, 39, 40, 24, 104, 107, 108, 94
30, 39, 29, 30, 40, 106, 109, 110, 107
31, 24, 40, 10, 1, 108, 111, 41, 98

```

```

32, 40, 30, 2, 10, 110, 112, 45, 111
*Nset, nset=_PickedSet24, internal
  3, 4, 8, 12, 18, 49, 52, 70, 72
*Elset, elset=_PickedSet24, internal
  3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16
*Nset, nset=_PickedSet100, internal
  3, 4, 8, 12, 18, 49, 52, 70, 72
*Elset, elset=_PickedSet100, internal
  3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16
*Elset, elset=__PickedSurf23_SPOS, internal, generate
  1, 32, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf23, internal
__PickedSurf23_SPOS, SPOS
*Elset, elset=__PickedSurf99_SPOS, internal, generate
  1, 32, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=_PickedSurf99, internal
__PickedSurf99_SPOS, SPOS
*Distribution, name=Ori-1-DiscOrient, location=ELEMENT, Table=Ori-1-DiscOrient_Table
** Description: Distribution generated from Discrete Orientation
, 1., 0., 0., 0., 1., 0.
1, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
2, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
3, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
0.382683426141739, 4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
4, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
0.382683426141739, 4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
5, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
6, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
7, -1.73212066946135e-17, 1., -4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
8, -1.73212066946135e-17, 1., -4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
9, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
10, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
11, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
0.382683426141739, 4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
12, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
0.382683426141739, 4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
13, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
14, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, -0.382683396339417
15, -1.73212066946135e-17, 1., -4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
16, -1.73212066946135e-17, 1., -4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, -0.923879563808441
17, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, 0.382683396339417
18, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, 0.382683396339417
19, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, 0.923879563808441
20, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, 0.923879563808441
21, -1.7321203385891e-17, 1., -4.18170901636587e-17,
0.382683396339417, 4.52624926295667e-17, 0.923879563808441
22, -1.7321203385891e-17, 1., -4.18170901636587e-17,

```



```

0.382683396339417, 4.52624926295667e-17, 0.923879563808441
23, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170934723812e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, 0.382683426141739
24, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170934723812e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, 0.382683426141739
25, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, 0.382683396339417
26, -1.00955395293737e-16, 1., 4.18170901636587e-17,
-0.923879563808441, -1.09273331627668e-16, 0.382683396339417
27, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, 0.923879563808441
28, -1.73212066946135e-17, 1., 4.18170934723812e-17,
-0.382683426141739, -4.52624959382891e-17, 0.923879563808441
29, -1.7321203385891e-17, 1., -4.18170901636587e-17,
0.382683396339417, 4.52624926295667e-17, 0.923879563808441
30, -1.7321203385891e-17, 1., -4.18170901636587e-17,
0.382683396339417, 4.52624926295667e-17, 0.923879563808441
31, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170934723812e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, 0.382683426141739
32, -1.00955395293737e-16, 1., -4.18170934723812e-17,
0.923879563808441, 1.09273331627668e-16, 0.382683426141739
*Orientation, name=Ori-1, system=RECTANGULAR
Ori-1-DiscOrient
3, 0.
** Region: (E-Glass/E layup-1: Generated From Layup)
*Elset, elset="E-Glass/E layup-1", generate
1, 32, 1
** Section: E-Glass/E layup-1
*Shell Section, elset="E-Glass/E layup-1", composite, orientation=Ori-1,
offset=SPOS, layup="E-Glass/E layup"
0.000125, 5, E-Glass/E, 55., Ply-1
0.000125, 5, E-Glass/E, -55., Ply-2
0.000125, 5, E-Glass/E, 55., Ply-3
0.000125, 5, E-Glass/E, -55., Ply-4
0.000125, 5, E-Glass/E, 55., Ply-5
0.000125, 5, E-Glass/E, -55., Ply-6
0.000125, 5, E-Glass/E, 55., Ply-7
0.000125, 5, E-Glass/E, -55., Ply-8
0.000125, 5, E-Glass/E, 55., Ply-9
0.000125, 5, E-Glass/E, -55., Ply-10
0.000125, 5, E-Glass/E, 55., Ply-11
0.000125, 5, E-Glass/E, -55., Ply-12
*End Instance
**
*Node
1, 0., -0.01999999996, 0.
*Node
2, 0., 0.1650000007, 0.
*Nset, nset=_PickedSet22, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet23, internal
1,
*Nset, nset=RP1
1,
*Nset, nset=RP2
2,
*Nset, nset=_PickedSet76, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet77, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet80, internal
2,
*Nset, nset=_PickedSet81, internal

```

```

1,
*Nset, nset=_PickedSet82, internal
1,
*Nset, nset=_PickedSet83, internal
1,
*Nset, nset="BC 1", instance=EqSteelCyl-1
1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 14, 17, 20, 41, 45, 53, 57, 63, 67
73, 76
*Elset, elset="BC 1", instance=EqSteelCyl-1
1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 17, 18, 23, 24, 25, 26, 31, 32
*Nset, nset="BC 2,3", instance=EqSteelCyl-1
1, 4, 6, 13, 15, 22, 23, 24, 44, 50, 58, 62, 84, 89, 94, 98
*Elset, elset="BC 2,3", instance=EqSteelCyl-1
1, 3, 6, 8, 10, 12, 13, 15, 18, 20, 22, 24, 25, 27, 29, 31
*Nset, nset=all, instance=EqSteelCyl-1, generate
1, 112, 1
*Nset, nset=bottom, instance=EqSteelCyl-1
2, 3, 5, 11, 16, 28, 29, 30, 46, 51, 56, 61, 101, 105, 109, 112
*Nset, nset=bottom-pivot, instance=EqSteelCyl-1
3, 11, 16, 28, 29, 30, 46, 51, 56, 61, 101, 105, 109, 112
*Nset, nset="bottom pivot", instance=EqSteelCyl-1
2, 5
*Nset, nset=top, instance=EqSteelCyl-1
7, 8, 9, 19, 21, 25, 26, 27, 66, 71, 77, 80, 83, 88, 93, 97
*Nset, nset="top pivot", instance=EqSteelCyl-1
7, 9
*Nset, nset=top-pivot, instance=EqSteelCyl-1
8, 19, 21, 25, 26, 27, 66, 71, 77, 80, 83, 88, 93, 97
*Surface, type=NODE, name=bottom_CNS_, internal
bottom, 1.
*Surface, type=NODE, name=top_CNS_, internal
top, 1.
*Surface, type=NODE, name="bottom pivot_CNS_", internal
"bottom pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name="top pivot_CNS_", internal
"top pivot", 1.
*Surface, type=NODE, name=bottom-pivot_CNS_, internal
bottom-pivot, 1.
*Surface, type=NODE, name=top-pivot_CNS_, internal
top-pivot, 1.
** Constraint: Dcoup_1
*Coupling, constraint name=Dcoup_1, ref node=_PickedSet81, surface=bottom_CNS_
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Dcoup_2
*Coupling, constraint name=Dcoup_2, ref node=_PickedSet76, surface=top_CNS_
*Distributing, weighting method=UNIFORM
** Constraint: Kcoup1_1
*Coupling, constraint name=Kcoup1_1, ref node=_PickedSet82,
surface="bottom pivot_CNS_"
*Kinematic
1, 1
2, 2
4, 4
5, 5
6, 6
** Constraint: Kcoup1_2
*Coupling, constraint name=Kcoup1_2, ref node=_PickedSet77, surface="top pivot_CNS_"
*Kinematic
1, 1
2, 2
4, 4
5, 5
6, 6

```

```

** Constraint: Kcoup2_1
*Coupling, constraint name=Kcoup2_1, ref node=_PickedSet83,
  surface=bottom-pivot_CNS_
*Kinematic
4, 4
6, 6
** Constraint: Kcoup2_2
*Coupling, constraint name=Kcoup2_2, ref node=_PickedSet80, surface=top-pivot_CNS_
*Kinematic
4, 4
6, 6
*End Assembly
*Distribution Table, name=Ori-1-DiscOrient_Table
coord3D, coord3D
**
** MATERIALS
**
*Material, name=E-Glass/E
*Elastic, type=ENGINEERING CONSTANTS
  3.83e+10, 1.056e+10, 1.056e+10, 0.29, 0.29, 0.42, 3.96e+09, 3.96e+09
  2.45e+09,
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 1", 1, 1
"BC 1", 5, 5
"BC 1", 6, 6
** Name: BC-2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 2,3", 2, 2
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
"BC 2,3", 4, 4
"BC 2,3", 6, 6
** Name: BC-4_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP1, 5, 5
RP1, 6, 6
** Name: BC-4_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP2, 5, 5
RP2, 6, 6
** Name: BC-5_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP1, 1, 1
RP1, 3, 3
** Name: BC-5_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP2, 1, 1
RP2, 3, 3
** Name: BC-6_1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP1, 3, 3
** Name: BC-6_2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
RP2, 3, 3
**
**
** STEP: Angular load
**
*Step, name="Angular load", nlgeom=YES

```

```

*Static
0.05, 1., 1e-05, 0.1
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: angular load 1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet23, 4, 4, -0.001
** Name: angular load 2 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet22, 4, 4, 0.001
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
RF, U, UR
*Element Output, directions=YES
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81
E, EE, S
*Element Output, directions=YES
82, 83, 84, 85
E, EE, S
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history
*Energy Output
ALLSE,
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**
*Node Output, nset=RP1
RF1, RF2, RF3, RM1, RM2, RM3, U1, U2
U3, UR1, UR2, UR3
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-3
**
*Node Output, nset=RP2
RF1, RF2, RF3, RM, RM1, RM2, RM3, RT
U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3
*End Step

```



Código “Matlab” do Cálculo Analítico do Ensaio de Compressão Radial

```
%% Compressão Radial. Determinação do Módulo de Young do Modelo Material Metálico

clear all
clc
close all

%% Dados obtidos após teste de compressão radial de uma porção de tubo
%de material desconhecido

FD1=importdata('Ensaio1_vel_5_lim_500N.csv',';',0);
Ft1=FD1(:,1);
Dt1=FD1(:,2);

FD2=importdata('Ensaio2_vel_5_lim_500N.csv',';',0);
Ft2=FD2(:,1);
Dt2=FD2(:,2);

FD3=importdata('Ensaio3_vel_5_lim_500N_90graus.csv',';',0);
Ft3=FD3(:,1);
Dt3=FD3(:,2);

%Gráfico F-D dos ensaios 1 a 3
figure(1);
hold on;grid on;box on;
plot(Dt1,Ft1,'b-');
plot(Dt2,Ft2,'r-');
plot(Dt3,Ft3,'g-');
legend('Ensaio 1','Ensaio 2','Ensaio 3');
ylabel('Força, P (N)');xlabel('Deslocamento, dw (mm)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Cálculo do Módulo de Young, segundo formulação publicada em
%'Roark's Formulas for Stress and Strain' (Roark) e em
%'Resistencia de materiales' (Feodosiev)

%dimensões do tubo (m):
L=0.1385; %comprimento
```

```

re=0.0505; %raio exterior
rm=0.04975; %raio médio
ri=0.0488; %raio interior
t=0.0015; %espessura
A=(pi*re^2)-(pi*ri^2); %área da seção transversal
I=(L*t^3)/12;

%condições de aplicação da formulação de Roark: — 1<L/r<18
% — r/t>10

%deflexão (w) devido a uma carga concentrada, diametralmente oposta,
%a meio comprimento
Dt1=Dt1/1000; %m
Dt2=Dt2/1000; %m
Dt3=Dt3/1000; %m

%Cálculo do Módulo de Young, segundo Roark e Feodosiev, nos ensaios 1 a 3
ER1=6.5*(Ft1./(Dt1*t))*((rm/t)^(1.5))*((L/rm)^(-0.75)); %Pa
EF1=((Ft1*rm^3)./(Dt1*I))*((2/pi)-(1/2)); %Pa

ER2=6.5*(Ft2./(Dt2*t))*((rm/t)^(1.5))*((L/rm)^(-0.75)); %Pa
EF2=((Ft2*rm^3)./(Dt2*I))*((2/pi)-(1/2)); %Pa

ER3=6.5*(Ft3./(Dt3*t))*((rm/t)^(1.5))*((L/rm)^(-0.75)); %Pa
EF3=((Ft3*rm^3)./(Dt3*I))*((2/pi)-(1/2)); %Pa

%Gráfico Módulo de Young–deslocamento dos ensaios 1 a 3
figure(2);
hold on;grid on;box on;
plot(Dt1,ER1,'b-',Dt1,EF1,'r—');
plot(Dt2,ER2,'g-',Dt2,EF2,'m—',Dt3,ER3,'k:',Dt3,EF3,'y-.');
legend('T1 – Young','T1 – Feodosiev','T2 – Young','T2 – Feodosiev',
'T3 – Young','T3 – Feodosiev');
ylabel('Módulo de Young, E (Pa)');xlabel('Deslocamento, dw (m)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Módulo de Young médio
ERf=(mean(ER1(250:end))+mean(ER2(250:end))+mean(ER3(250:end)))/3; %Roark médio
ERm=ERf*ones(1,length(Dt1));

EFf=(mean(EF1(250:end))+mean(EF2(250:end))+mean(EF3(250:end)))/3; %Feodosiev médio
EFm=EFf*ones(1,length(Dt1));

figure(3);
hold on;grid on;box on;
plot(Dt1,ER1,'b-',Dt1,EF1,'r—');
plot(Dt2,ER2,'g-',Dt2,EF2,'m—',Dt3,ER3,'k:',Dt3,EF3,'y-.');
plot(Dt1,ERm,'r—',Dt1,EFm,'b—','LineWidth',2);
legend('T1 – Young','T1 – Feodosiev','T2 – Young','T2 – Feodosiev',
'T3 – Young','T3 – Feodosiev','Young médio','Feodosiev médio');
ylabel('Módulo de Young, E (Pa)');xlabel('Deslocamento, dw (m)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Comparação com dados obtidos por simulação por elementos finitos,
%usando o Módulo de Young obtido em cada uma das formulações

%Importação dos dados da simulação, Roark
FD_ab_R=importdata('FD_abaqus_Roark.csv',';',0);
F_ab_R=FD_ab_R(:,2); %N
D_ab_R=FD_ab_R(:,1); %m

%Importação dos dados da simulação, Feodosiev
FD_ab_F=importdata('FD_abaqus_Feodosiev.csv',';',0);

```

```

F_ab_F=FD_ab_F(:,2); %N
D_ab_F=FD_ab_F(:,1); %m

figure(4);
hold on;grid on;box on;
plot(Dt1,Ft1,'b-');
plot(Dt2,Ft2,'r-');
plot(Dt3,Ft3,'g-');
plot(D_ab_R,F_ab_R,'rs',D_ab_F,F_ab_F,'bo');
legend('Ensaio 1','Ensaio 2','Ensaio 3','Abaqus Young','Abaqus Feodosiev');
ylabel('Força, P (N)');xlabel('Deslocamento, dw (mm)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

```




Código “Abaqus” Simplificado da Análise por Elementos Finitos do Ensaio de Compressão Radial

```
*Heading
** Job name: NodalRadialCompression Model name: Nodal Radial Compression
** Generated by: Abaqus/CAE 6.10-1
**Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=anel
*End Part
**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=anel-1, part=anel
*Node
    1,          0., -0.0496499985, 0.0825000033
    2,          0., 0.0496499985, 0.0825000033
    3, 0.0364829898, 0.0336766057, 0.165000007
    4,          0., 0.0496499985, 0.165000007
    5,          0., -0.0496499985, 0.165000007
    6,          0., 0.0496499985, 0.
    7,          0., -0.0496499985, 0.
    8, 0.0364829898, 0.0336766057, 0.
    9, 0.035107851, -0.035107851, 0.0825000033
   10, 0.0496499985, 0., 0.0825000033
   11, 0.035107851, 0.035107851, 0.0825000033
   12,          0., 0.0496499985, 0.123750001
   13, 0.0496323667, -0.0013231379, 0.165000007
   14, 0.0346368924, -0.0355725773, 0.165000007
   15,          0., -0.0496499985, 0.123750001
   16, -0.035107851, -0.035107851, 0.0825000033
   17, -0.0496499985, 0., 0.0825000033
   18, -0.035107851, 0.035107851, 0.0825000033
   19,          0., 0.0496499985, 0.0412500016
   20, -0.035107851, 0.035107851, 0.
```

21, -0.0496499985, 0., 0.
 22, -0.035107851, -0.035107851, 0.
 23, 0., -0.0496499985, 0.0412500016
 24, -0.035107851, -0.035107851, 0.165000007
 25, -0.0496499985, 0., 0.165000007
 26, -0.035107851, 0.035107851, 0.165000007
 27, 0.0346368924, -0.0355725773, 0.
 28, 0.0496323667, -0.0013231379, 0.
 29, 0.0348731466, -0.0353409983, 0.123750001
 30, 0.0496455915, -0.000661627681, 0.123750001
 31, 0.035802573, 0.0343991034, 0.123750001
 32, -0.035107851, -0.035107851, 0.0412500016
 33, -0.0496499985, 0., 0.0412500016
 34, -0.035107851, 0.035107851, 0.0412500016
 35, -0.035107851, 0.035107851, 0.123750001
 36, -0.0496499985, 0., 0.123750001
 37, -0.035107851, -0.035107851, 0.123750001
 38, 0.035802573, 0.0343991034, 0.0412500016
 39, 0.0496455915, -0.000661627681, 0.0412500016
 40, 0.0348731466, -0.0353409983, 0.0412500016
 41, 0.0190002322, -0.045870617, 0.0825000033
 42, 0.0349906944, -0.0352246203, 0.103125006
 43, 0.0188473072, -0.0459336638, 0.123750001
 44, 0., -0.0496499985, 0.103124999
 45, 0.045870617, -0.0190002322, 0.0825000033
 46, 0.0496488996, -0.000330821204, 0.103125006
 47, 0.0456784293, -0.019457737, 0.123750001
 48, 0.045870617, 0.0190002322, 0.0825000033
 49, 0.0354569815, 0.034755215, 0.103125006
 50, 0.04618074, 0.0182335302, 0.123750001
 51, 0.0190002322, 0.045870617, 0.0825000033
 52, 0., 0.0496499985, 0.103124999
 53, 0.019457737, 0.0456784293, 0.123750001
 54, 0.0347552113, -0.0354569815, 0.144374996
 55, 0.0186941717, -0.0459962003, 0.165000007
 56, 0., -0.0496499985, 0.144374996
 57, 0.0496400818, -0.000992404763, 0.144374996
 58, 0.0454816781, -0.019913299, 0.165000007
 59, 0.0361445881, 0.034039557, 0.144374996
 60, 0.0464780517, 0.0174617656, 0.165000007
 61, 0., 0.0496499985, 0.144374996
 62, 0.019913299, 0.0454816781, 0.165000007
 63, -0.0190002322, -0.045870617, 0.0825000033
 64, -0.035107851, -0.035107851, 0.0618750006
 65, -0.0190002322, -0.045870617, 0.0412500016
 66, 0., -0.0496499985, 0.0618750006
 67, -0.045870617, -0.0190002322, 0.0825000033
 68, -0.0496499985, 0., 0.0618750006
 69, -0.045870617, -0.0190002322, 0.0412500016
 70, -0.045870617, 0.0190002322, 0.0825000033
 71, -0.035107851, 0.035107851, 0.0618750006
 72, -0.045870617, 0.0190002322, 0.0412500016
 73, -0.0190002322, 0.045870617, 0.0825000033
 74, 0., 0.0496499985, 0.0618750006
 75, -0.0190002322, 0.045870617, 0.0412500016
 76, -0.035107851, -0.035107851, 0.0206250008
 77, -0.0190002322, -0.045870617, 0.
 78, 0., -0.0496499985, 0.0206250008
 79, -0.0496499985, 0., 0.0206250008
 80, -0.045870617, -0.0190002322, 0.
 81, -0.035107851, 0.035107851, 0.0206250008
 82, -0.045870617, 0.0190002322, 0.
 83, 0., 0.0496499985, 0.0206250008

```

84, -0.0190002322, 0.045870617, 0.
85, -0.035107851, 0.035107851, 0.103125006
86, -0.0190002322, 0.045870617, 0.123750001
87, -0.0496499985, 0., 0.103125006
88, -0.045870617, 0.0190002322, 0.123750001
89, -0.035107851, -0.035107851, 0.103125006
90, -0.045870617, -0.0190002322, 0.123750001
91, -0.0190002322, -0.045870617, 0.123750001
92, -0.035107851, 0.035107851, 0.144374996
93, -0.0190002322, 0.045870617, 0.165000007
94, -0.0496499985, 0., 0.144374996
95, -0.045870617, 0.0190002322, 0.165000007
96, -0.035107851, -0.035107851, 0.144374996
97, -0.045870617, -0.0190002322, 0.165000007
98, -0.0190002322, -0.045870617, 0.165000007
99, 0.0354569815, 0.034755215, 0.0618750006
100, 0.019457737, 0.0456784293, 0.0412500016
101, 0.0496488996, -0.000330821204, 0.0618750006
102, 0.04618074, 0.0182335302, 0.0412500016
103, 0.0349906944, -0.0352246203, 0.0618750006
104, 0.0456784293, -0.019457737, 0.0412500016
105, 0.0188473072, -0.0459336638, 0.0412500016
106, 0.0361445881, 0.034039557, 0.0206250008
107, 0.019913299, 0.0454816781, 0.
108, 0.0496400818, -0.000992404763, 0.0206250008
109, 0.0464780517, 0.0174617656, 0.
110, 0.0347552113, -0.0354569815, 0.0206250008
111, 0.0454816781, -0.019913299, 0.
112, 0.0186941717, -0.0459962003, 0.
*Element, type=S8R
1, 1, 9, 29, 15, 41, 42, 43, 44
2, 9, 10, 30, 29, 45, 46, 47, 42
3, 10, 11, 31, 30, 48, 49, 50, 46
4, 11, 2, 12, 31, 51, 52, 53, 49
5, 15, 29, 14, 5, 43, 54, 55, 56
6, 29, 30, 13, 14, 47, 57, 58, 54
7, 30, 31, 3, 13, 50, 59, 60, 57
8, 31, 12, 4, 3, 53, 61, 62, 59
9, 1, 16, 32, 23, 63, 64, 65, 66
10, 16, 17, 33, 32, 67, 68, 69, 64
11, 17, 18, 34, 33, 70, 71, 72, 68
12, 18, 2, 19, 34, 73, 74, 75, 71
13, 23, 32, 22, 7, 65, 76, 77, 78
14, 32, 33, 21, 22, 69, 79, 80, 76
15, 33, 34, 20, 21, 72, 81, 82, 79
16, 34, 19, 6, 20, 75, 83, 84, 81
17, 2, 18, 35, 12, 73, 85, 86, 52
18, 18, 17, 36, 35, 70, 87, 88, 85
19, 17, 16, 37, 36, 67, 89, 90, 87
20, 16, 1, 15, 37, 63, 44, 91, 89
21, 12, 35, 26, 4, 86, 92, 93, 61
22, 35, 36, 25, 26, 88, 94, 95, 92
23, 36, 37, 24, 25, 90, 96, 97, 94
24, 37, 15, 5, 24, 91, 56, 98, 96
25, 2, 11, 38, 19, 51, 99, 100, 74
26, 11, 10, 39, 38, 48, 101, 102, 99
27, 10, 9, 40, 39, 45, 103, 104, 101
28, 9, 1, 23, 40, 41, 66, 105, 103
29, 19, 38, 8, 6, 100, 106, 107, 83
30, 38, 39, 28, 8, 102, 108, 109, 106
31, 39, 40, 27, 28, 104, 110, 111, 108
32, 40, 23, 7, 27, 105, 78, 112, 110
*Nset, nset=_PickedSet11, internal, generate

```

```

1, 112, 1
*Elset, elset=_PickedSet11, internal, generate
1, 32, 1
** Section: Steel Section_Roark
*Shell Section, elset=_PickedSet11, material=Steel_Roark
0.0015, 5
*End Instance
**
*Node
1, 0., 0.05999999987, 0.0825000033
*Nset, nset=Set-4, instance=anel-1
1, 2, 9, 10, 11, 16, 17, 18, 41, 45, 48, 51, 63, 67, 70, 73
*Elset, elset=Set-4, instance=anel-1
1, 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 27, 28
*Nset, nset=RP
1,
*Nset, nset=all, instance=anel-1, generate
1, 112, 1
*Nset, nset=bot, instance=anel-1
1, 5, 7, 15, 23, 44, 56, 66, 78
*Nset, nset=top, instance=anel-1
2, 4, 6, 12, 19, 52, 61, 74, 83
*Elset, elset=_Surf-3_SPOS, internal, instance=anel-1, generate
1, 32, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-3
_Surf-3_SPOS, SPOS
*Nset, nset="_T-Datum csys-1", internal
bot,
top,
Set-4,
RP,
*Transform, nset="_T-Datum csys-1"
1., 0., 0., 0., 1., 0.
** Constraint: Constraint-1
*Equation
2
top, 2, 1.
RP, 2, -1.
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name=Steel_Feodosiev
*Elastic
2.21456e+11, 0.29
*Material, name=Steel_Roark
*Elastic
1.97231e+11, 0.29
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
bot, 1, 1
bot, 2, 2
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
top, 1, 1
** Name: BC-4 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
Set-4, 3, 3
**
**

```

```

** STEP: deflect
**
*Step, name=deflect, nlgeom=YES, inc=1000
*Static
0.01, 1., 1e-05, 0.1
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
bot, 1, 1
bot, 2, 2
** Name: BC-3 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
top, 1, 1
** Name: BC-4 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
Set-4, 3, 3
** Name: BC-5 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
RP, 2, 2, -0.00095
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
RF, U
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history
*Node Output, nset=RP
RF1, RF2, RF3, RM1, RM2, RM3, U1, U2
U3, UR1, UR2, UR3
*End Step

```


Código “Matlab” do Tratamento de Dados Experimentais Sobre a Flexão Negativa do Conjunto de Teste

```
% Ensaio de Flexão Negativa em curva segmentada múltipla (dois segmentos)

clear all
clc
close all

%% Dados obtidos após teste de Flexão Negativa do espécime de ensaio

%Dados do ensaio 1:
FDt1=importdata('ensaio1.csv',';',0);
Ft1=FDt1(:,1);
Dt1=FDt1(:,2);

%Dados do ensaio 2:
FDt2=importdata('ensaio2.csv',';',0);
Ft2=FDt2(:,1);
Dt2=FDt2(:,2);

%Dados do ensaio 3:
FDt3=importdata('ensaio3.csv',';',0);
Ft3=FDt3(:,1);
Dt3=FDt3(:,2);

%Gráficos F-D dos ensaios 1 a 3
figure(1);
hold on;grid on;box on;
plot(Dt1,Ft1,'b-');
plot(Dt2,Ft2,'r-');
plot(Dt3,Ft3,'g-','LineWidth',2);
legend('Ensaio 1','Ensaio 2','Ensaio 3');
ylabel('Força, F (N)');xlabel('Deslocamento, dH (mm)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Seleção da parte linear das curvas dos testes 1 a 3
```

```

%Procura o indice do valor a partir do qual existe linearidade
for n=1:length(Dt1);
    if round(Dt1(n)*10^3)/10^3==1.442
        i=n;
        break
    end
end

for n=1:length(Dt2);
    if round(Dt2(n)*10^3)/10^3==1.151
        k=n;
        break
    end
end

for n=1:length(Dt3);
    if round(Dt3(n)*10^3)/10^3==1.296
        j=n;
        break
    end
end

%vetores deslocamento e força do teste 1 truncados
Fst1=Ft1((i):end); %N
Dst1=Dt1((i):end); %mm
%vetores deslocamento e força do teste 1 deslocados para a origem
Fst1=Fst1-Fst1(1); %N
Dst1=Dst1-Dst1(1); %mm
%retira o primeiro valor, uma vez que este é zero
Fst1=Fst1((2):end); %N
Dst1=Dst1((2):end); %mm

%vetores deslocamento e força do teste 2 truncados
Fst2=Ft2((k):end); %N
Dst2=Dt2((k):end); %mm
%vetores deslocamento e força do teste 2 deslocados para a origem
Fst2=Fst2-Fst2(1); %N
Dst2=Dst2-Dst2(1); %mm
%retira o primeiro valor, uma vez que este é zero
Fst2=Fst2((2):end); %N
Dst2=Dst2((2):end); %mm

%vetores deslocamento e força do teste 3 truncados
Fst3=Ft3((j):end); %N
Dst3=Dt3((j):end); %mm
%vetores deslocamento e força do teste 3 deslocados para a origem
Fst3=Fst3-Fst3(1); %N
Dst3=Dst3-Dst3(1); %mm
%retira o primeiro valor, uma vez que este é zero
Fst3=Fst3((2):end); %N
Dst3=Dst3((2):end); %mm

%Gráficos F-D, tratados e deslocados para a origem
figure(2);
hold on;grid on;box on;
plot(Dst1,Fst1,'b-');
plot(Dst2,Fst2,'r-');
plot(Dst3,Fst3,'g-', 'LineWidth',2);
legend('Ensaio 1','Ensaio 2','Ensaio 3');
ylabel('Força, F (N)');xlabel('Deslocamento, dH (mm)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%% Transformação dos dados F-D para o par M-D_angular

```



```

L=0.512; %Comprimento de uma 'perna' do conjunto de teste, m
B=0.4; %braço da força Fst, m
%altura entre os pontos de amarração, ao longo da linha de ação da força, m
H=sqrt(2)*L;
%ângulo inicial entre a linha de ação da força e uma perna do conjunto de
%ensaio, rad
ang=pi/4;

%Momentos e deslocamento angular
dalfa1=ang-acos(((H+(Dst1/10^3))/2)/L); %rad
M1=(Fst1.*sin(ang-dalfa1))*B; %Nm

dalfa2=ang-acos(((H+(Dst2/10^3))/2)/L); %rad
M2=(Fst2.*sin(ang-dalfa2))*B; %Nm

dalfa3=ang-acos(((H+(Dst3/10^3))/2)/L); %rad
M3=(Fst3.*sin(ang-dalfa3))*B; %Nm

%Curva M-D_angular média
M_med=(M1(1:232)+M2(1:232)+M3(1:232))./3;
dalfa_med=(dalfa1(1:232)+dalfa2(1:232)+dalfa3(1:232))./3;

%Guarda dados M-D_angular médios em ficheiro CSV
D=[M_med dalfa_med];
dlmwrite('M_da_0.001_iso_Exp.csv',D,'delimiter',';');

%Gráficos M-D_angular dos ensaios 1 a 3
figure(3);
hold on;grid on;box on;
plot(dalfa1,M1,'b-');
plot(dalfa2,M2,'r-');
plot(dalfa3,M3,'g-', 'LineWidth',2);
legend('Ensaio 1','Ensaio 2','Ensaio 3');
ylabel('Momento, M (Nm)');xlabel('Deslocamento angular, dalfa (rad)');
set(gca,'XMinorTick','on','YMinorTick','on');

%Forças, deslocamentos, momentos e deslocamentos angulares máximos
Fst1_max=max(Fst1);
Fst2_max=max(Fst2);
Fst3_max=max(Fst3);

Dst1_max=max(Dst1);
Dst2_max=max(Dst2);
Dst3_max=max(Dst3);

M1_max=max(M1);
M2_max=max(M2);
M3_max=max(M3);

dalfa1_max=max(dalfa1);
dalfa2_max=max(dalfa2);
dalfa3_max=max(dalfa3);

```




Desenhos Técnicos do Conjunto de Teste Afeto à Análise Experimental